SIEMENS

# TASCHENBUCH

für

Elektromeßtechnik

SIEMENS

# TASCHENBUCH

für

Elektromeßtechnik

4. Auflage

SIEMENS & HALSKE AKTIENGESELLSCHAFT

WERNERWERK FÜR MESSTECHNIK

Herausgeber Siemens & Halske Aktiengesellschaft
Alle Rechte vorbehalten
Printed in Germany

## Vorwort

Die Elektromeßtechnik, ebenso alt wie die Elektrotechnik selbst, hat mit deren Entwicklung ständig Schritt gehalten und alle neuen Methoden und Mittel, die anwendbar waren, in ihren Dienst gestellt. So steht heute den vielseitigen Ansprüchen eine große Auswahl von Meßverfahren und Meßgeräten gegenüber.

Das Taschenbuch soll einen Überblick über die wesentlichen Verfahren und Geräte der Elektromeßtechnik sowie über ihre Anwendungen geben; dem Studierenden wird es neben den einschlägigen Lehr- und Handbüchern die Einführung in die Meßtechnik erleichtern. Mit seinen zahlreichen Tafeln und Aufstellungen soll das Buch eine handliche Arbeitsunterlage sein.

Die vorliegende 4. Auflage ist dem gegenwärtigen Stand der Technik angepaßt.

SIEMENS & HALSKE
AKTIENGESELLSCHAFT
WERNERWERK FÜR MESSTECHNIK

Karlsruhe, im März 1964

Eingetragene Warenzeichen der Siemens & Halske AG, die in diesem Taschenbuch erwähnt werden

DIGIZET
ELEKTRONENSTRAHL-OSCILLOMAT
ELMISKOP
FERROMETER
GEOSKOP
KOMPENSOGRAPH
KRISTALLOFLEX
LICHTSTRAHL-OSCILLOMAT
MULTITRON
MULTIZET
OSCILLAR
OSCILLARZET
OSCILLOFIL
OSCILLOGRAND
OSCILLOMINK
OSCILLOPORT
SPANNUNGSLUPE
TELEPERM

# INHALT


**I. Physikalisch-chemische Tafeln** . . . . . 1

Griechisches Alphabet . . . . . 1
Schreibweise physikalischer Gleichungen nach DIN 1313 . . . . 1
Formelzeichen und Einheiten mechanischer Größen . . . . . 2
Formelzeichen und Einheiten elektrischer und magnetischer Größen . . . . . 3
Festsetzungen der seit 1948 international geltenden (absoluten) praktischen Einheiten und der früheren internationalen Einheiten (mit Index int) . . . . . 4
Permeabilität und Dielektrizitätskonstante (DK) . . . . . 4
Frequenzen und Wellenlängen elektromagnetischer Schwingungen 5
Bezeichnung dekadisch vervielfachter Einheiten . . . . . 5
Umrechnung deutscher, englischer und amerikanischer Einheiten 6
Periodisches System der Elemente (bezogen auf $^{12}C$) . . . . . 8
Elektrochemische Spannungsreihe der Ionenleiter . . . . . 9
Thermoelektrische Spannungsreihe der Metalle . . . . . 9
Cu-Drähte, Abmessungen und Widerstandswerte . . . . . 9
Eigenschaften elektrischer Leiter . . . . . 10
Eigenschaften magnetisch weicher Werkstoffe . . . . . 12
Eigenschaften von Dauermagnet-Werkstoffen . . . . . 13
Eigenschaften elektrischer Isolierstoffe I . . . . . 14
Eigenschaften elektrischer Isolierstoffe II . . . . . 15

**II. Grundgleichungen und Grundbegriffe der Elektrotechnik und des Magnetismus** . . . . . 17

Grundgleichungen der Elektrotechnik . . . . . 17
Grundgleichungen des Magnetismus . . . . . 21
Fotoelektrizität . . . . . 22
Thermoelektrizität . . . . . 24
Piezoelektrizität . . . . . 25
Galvanomagnetische Effekte . . . . . 25
Magnetostriktion . . . . . 26

**III. Grundbegriffe der Elektromeßtechnik** . . . . . 27
Begriffserklärungen . . . . . 27
Klasseneinteilung und Fehlergrenzen elektrischer Meßgeräte nach VDE 0410/10.59 (Tafeln) . . . . . 29
Korrektionen bei Feinmessungen . . . . . 30
Prüfspannungen lt. VDE 0410/10.59 (Tafel) . . . . . 31
Meßbereich-Endwerte nach DIN 43701 (Tafel) . . . . . 31
Sinnbilder für Meßinstrumentaufschriften (Tafel) . . . . . 32
Darstellungen von elektrischen Meßinstrumenten und Meßgeräten in Schaltzeichnungen (Tafel) . . . . . 33
In der Elektromeßtechnik ausgenutzte elektrische Wirkungen (Tafel) . . . . . 34

**IV. Technik der elektrischen Meßinstrumente** . . . . . 36
Meßwerke . . . . . 36
Ausführungen elektrischer Anzeigeinstrumente . . . . . 47
Ausführungen elektrischer Schreiber . . . . . 63
Ausführungen von Oszillographen . . . . . 80
Digital-Meßgeräte . . . . . 108

**V. Strom- und Spannungsmessung** . . . . . 113
Allgemeines . . . . . 113
Gleichstrom- und Gleichspannungsmessung . . . . . 113
Leistungslose Spannungsmessung . . . . . 133
Wechselstrom- und Wechselspannungsmessung (Niederfrequenz) . . . . . 144
Wechselstrom- und Wechselspannungsmessung (Hochfrequenz) . . . . . 151

**VI. Leistungs- und Leistungsfaktormessung** . . . . . 154
Leistungsmessung . . . . . 154
Leistungsfaktormessung . . . . . 165

**VII. Synchronisiereinrichtungen** . . . . . 168

**VIII. Zeiger-Messungen** . . . . . 170
Zeiger-Meßanordnung mit Synchronschalter und Drehspulinstrument . . . . . 170
Zeiger-Meßanordnung mit Gleichrichter-Drehspulinstrument und Dreheiseninstrument . . . . . 174

**IX. Wandler** . . . . . 178
Begriffserklärungen . . . . . 178
Stromwandler . . . . . 179
Spannungswandler . . . . . 191
Kombinierte Strom- und Spannungswandler . . . . . 196

**X. Widerstands- und Isolationsmessung** . . . . . 201
Gegenüberstellung der Meßverfahren . . . . . 201
Direktanzeigende Meßgeräte . . . . . 201
Meßbrücken und Ausschlagsvergleich-Meßeinrichtungen . . 207

**XI. Kapazitäts- und Induktivitätsmessung** . . . . . 220

**XII. Verlustfaktormessung** . . . . . 223

**XIII. Fernmessung** . . . . . 226
Fernmessung über galvanisch durchgeschaltete Leitungen . 227
Fernmessung über abgeriegelte Leitungen (Schutzübertrager) 228
Fernmessung über Trägerfrequenzsysteme . . . . . 229

**XIV. Eisen-Meßeinrichtungen** . . . . . 231
Allgemeines . . . . . 231
Messungen bei Gleichstrommagnetisierung . . . . . 232
Messungen bei Wechselstrommagnetisierung . . . . . 233

**XV. Elektrische Prüfeinrichtungen** . . . . . 238
Isolations-Prüfeinrichtungen . . . . . 238
Kabel-Prüfeinrichtungen . . . . . 240
Relais-Prüfeinrichtungen . . . . . 243
Scheitelspannungs-Meßeinrichtung . . . . . 244
Meßwandler-Prüfeinrichtungen . . . . . 245
Zähler-Prüfeinrichtungen . . . . . 248

XVI. Elektromikroskopie . . . . . 252

XVII. Strahlungsmessung . . . . . 257

XVIII. Einrichtungen für röntgenographische Analysenverfahren 263

Fachwörter, Englisch-Deutsch . . . . . 267

Stichwörter . . . . . 277

# I. Physikalisch-chemische Tafeln

**Tafel 1** Griechisches Alphabet

| | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Alpha | $A$ | $\alpha$ | Eta | $H$ | $\eta$ | Ny | $N$ | $\nu$ | Tau | $T$ | $\tau$ |
| Beta | $B$ | $\beta$ | Theta | $\Theta$ | $\vartheta$ | Xi | $\Xi$ | $\xi$ | Ypsilon | $Y$ | $\upsilon$ |
| Gamma | $\Gamma$ | $\gamma$ | Jota | $I$ | $\iota$ | Omikron | $O$ | $o$ | Phi | $\Phi$ | $\varphi$ |
| Delta | $\Delta$ | $\delta$ | Kappa | $K$ | $\varkappa$ | Pi | $\Pi$ | $\pi$ | Chi | $X$ | $\chi$ |
| Epsilon | $E$ | $\varepsilon$ | Lambda | $\Lambda$ | $\lambda$ | Rho | $P$ | $\varrho$ | Psi | $\Psi$ | $\psi$ |
| Zeta | $Z$ | $\zeta$ | My | $M$ | $\mu$ | Sigma | $\Sigma$ | $\sigma$ ($\varsigma$) | Omega | $\Omega$ | $\omega$ |

**Tafel 2** Schreibweise physikalischer Gleichungen nach DIN 1313

Größe = Zahlenwert × Einheit (z. B. $s = 288$ km)

| | |
|---|---|
| Allgemeine Größengleichung<br>$v = \frac{s}{t}$ | Formelzeichen ≡ Größe.<br>Die allgemeine Größengleichung gilt für jede Einheitenwahl. Die Einheitensymbole können wie Faktoren behandelt werden; für $s = 288$ km und $t = 4$ h ist z. B. $v = \frac{288\,\text{km}}{4\,\text{h}} = 72\,\frac{\text{km}}{\text{h}} = 72\,\frac{10^5\,\text{cm}}{3600\,\text{s}} = 2 \cdot 10^3\,\frac{\text{cm}}{\text{s}}$. |
| Zugeschnittene Größengleichung<br>$\frac{v}{\text{km/h}} = \frac{s/\text{km}}{t/\text{h}}$<br>$\frac{v}{\text{cm/s}} = 27{,}8\,\frac{s/\text{km}}{t/\text{h}}$ | Identische Erweiterung der allgem. Größengleichung. Man erhält aus den „auf die Einheiten km/h, km und h oder cm/s, km und h zugeschnittenen" Größengleichungen den Zahlenwert (Größe/Einheit) der Geschwindigkeit in km/h oder cm/s, wenn man die Zahlenwerte für den Weg in km und für die Zeit in h einsetzt. |
| Zahlenwertgleichung<br>$v = \frac{s}{t}$<br>$v = 27{,}8\,\frac{s}{t}$ | Formelzeichen ≡ Zahlenwert.<br>Durch einen Bezeichnungswechsel ist der unmittelbare Übergang von den zugeschn. Größengl. zu den Zahlenwertgl. möglich. Diese erhalten erst durch Angabe der zugrunde liegenden Einheiten eine bestimmte Bedeutung. Ist die Zahlenwertgl. auf „abgestimmte" Einheiten bezogen, dann gleicht ihre äußere Form der der allgem. Größengl., enthalten ihre zugehörigen Einheitenbeziehungen einen Zahlenfaktor, dann unterscheiden sie sich um den reziproken Wert des Faktors. |
| „Mischgleichung"<br>$v = \frac{s}{t}$ in $\frac{\text{km}}{\text{h}}$<br>$v = 27{,}8\,\frac{s}{t}$ in $\frac{\text{cm}}{\text{s}}$ | Zahlenwertgleichung mit zugesetzter Einheit, auf die die auszurechnende Größe zu beziehen ist. Die Schreibweise ohne das Wort „in" ist abzulehnen, weil sonst der Eindruck erweckt wird, es handele sich um zugeschnittene Größengleichungen mit der Einheit als Faktor, $v$ als Größe und $s$ und $t$ als Zahlenwerte. |

**Tafel 3** Formelzeichen und Einheiten mechanischer Größen

| Größe | Formelzeichen | Einheit im MKS-System | Einheit im techn. Einh.-S. | Einheit im CGS-System | Eine MKS-Einheit ... techn. Einheiten | Eine MKS-Einheit ... CGS-Einheiten |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Länge | $l, L$ | m | m | cm | 1 | $10^2$ |
| Fläche | $A, S, F$ | $m^2$ | $m^2$ | $cm^2$ | 1 | $10^4$ |
| Rauminhalt, Volum | $V, \tau$ | $m^3$ | $m^3$ | $cm^3$ | 1 | $10^6$ |
| Zeit | $t, \tau, z$ | s | s | s | 1 | 1 |
| Geschwindigkeit | $v, u, w$ | m/s | m/s | cm/s | 1 | $10^2$ |
| Winkelgeschwindigkeit | $\omega, \Omega$ | 1/s | 1/s | 1/s | 1 | 1 |
| Beschleunigung | $a, b$ | $m/s^2$ | $m/s^2$ | $cm/s^2 = Gal$ | 1 | $10^2$ |
| Winkelbeschleunigung | $\omega'$ | $1/s^2$ | $1/s^2$ | $1/s^2$ | 1 | 1 |
| Masse | $m$ | kg | $kps^2/m$ | g | 0,10197 | $10^3$ |
| Dichte | $\varrho, d$ | $kg/m^3$ | $kps^2/m^4$ | $g/cm^3$ | 0,10197 | $10^{-3}$ |
| Wichte | $\gamma$ | $kg/m^2s^2 = N/m^3$ | $kp/m^3$ | $g/cm^2s^2$ | 0,10197 | $10^{-1}$ |
| Kraft, Gewicht | $F, P, K, G$ | $kg\ m/s^2 = N$ | kp | $g\ cm/s^2 = dyn$ | 0,10197 | $10^5$ |
| Druck | $p$ | $kg/ms^2 = N/m^2$ | $kp/m^2$ | $g/cms^2 = dyn/cm^2$ | 0,10197 | 10 |
| Arbeit, Energie, Wärmemenge | $A, W, Q$ | $kg\ m^2/s^3 = Nm = Ws = J$ | kp m | $g\ cm^2/s^2 = erg$ | 0,10197 | $10^7$ |
| Leistung | $P, N$ | $kg\ m^2/s^2 = Nm/s = J/s = W$ | kp m/s | $g\ cm^2/s^3 = erg/s$ | 0,10197 | $10^7$ |
| Trägheitsmoment | $J, \Theta$ | $kg\ m^2$ | $kp\ m\ s^2$ | $g\ cm^2$ | 0,10197 | $10^7$ |
| Moment einer Kraft | $M, T$ | $kg\ m^2/s^2 = Nm$ | kp m | $g\ cm^2/s^2$ | 0,10197 | $10^7$ |
| Kompressibilität | $\varkappa$ | $m\ s^2/kg$ | $m^2/kp$ | $cm\ s^2/g$ | 9,80665 | $10^{-1}$ |
| Oberflächenspannung | $\sigma, \gamma$ | $kg/s^2$ | kp/m | $g/s^2$ | 0,10197 | $10^3$ |
| Dynamische Viskosität | $\eta$ | kg/m s | $kp\ s/m^2$ | $g/cm\ s = P$ | 0,10197 | 10 |
| Kinematische Viskosität | $\nu$ | $m^2/s$ | $m^2/s$ | $cm^2/s = St$ | 1 | $10^4$ |

Beispiel zur Umrechnung von techn. Einheiten in CGS-Einheiten: 0,10197 kpm = $10^7$ erg, 1 kpm = $9{,}80665 \cdot 10^7$ erg (Norm-Fallbeschleunigung $g_n = 9{,}80665\ m/s^2$; $1/g_n = 0{,}10197\ s^2/m$).
Umrechnung nichtkohärenter Einheiten s. Tafel 9, S. 6.

**Tafel 4** Formelzeichen und Einheiten elektrischer und magnetischer Größen

| Größe | Formelzeichen | Einheit im MKSA-System (Giorgi-System) | Einheit im elektrostat. CGS-System | Einheit im elektromagnet. CGS-System | Eine MKSA-Einheit ...el.-stat. Einheiten | Eine MKSA-Einheit ...el.-magn. Einheiten |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Elektr. Spannung | $U$ | $kg\,m^2/s^3\,A = W/A = V$ | $g^{1/2}\,cm^{1/2}/s$ | $g^{1/2}\,cm^{3/2}/s^2$ | $0{,}333 \cdot 10^{-2}$ | $10^8$ |
| Elektr. Feldstärke | $\boldsymbol{E}$ | $kg\,m/s^3\,A = N/C = V/m$ | $g^{1/2}/cm^{1/2}\,s$ | $g^{1/2}\,cm^{1/2}/s^2$ | $0{,}333 \cdot 10^{-4}$ | $10^6$ |
| Elektrizitätsmenge | $Q, q$ | $As = C$ | $g^{1/2}\,cm^{3/2}/s$ | $g^{1/2}\,cm^{1/2}$ | $3 \cdot 10^9$ | $10^{-1}$ |
| Elektr. Verschiebung | $\boldsymbol{D}$ | $As/m^2 = C/m^2$ | $g^{1/2}/cm^{1/2}\,s$ | $g^{1/2}/cm^{3/2}$ | $3 \cdot 10^5$ | $10^{-5}$ |
| Elektr. Kapazität | $C$ | $A^2s^4/kg\,m^2 = s/\Omega = C/V = F$ | $cm$ | $s^2/cm$ | $9 \cdot 10^{11}$ | $10^{-9}$ |
| Abs. Dielektr.-Konst. | $\epsilon$ | $A^2s^4/kg\,m^3 = F/m$ | $g^0\,cm^0\,s^0$ | $s^2/cm^2$ | $1{,}129 \cdot 10^{11}$ | $1{,}256 \cdot 10^{-10}$ |
| Elektr. Stromstärke | $I$ | $A$ | $g^{1/2}\,cm^{3/2}/s^2$ | $g^{1/2}\,cm^{1/2}/s$ | $3 \cdot 10^9$ | $10^{-1}$ |
| Elektr. Stromdichte | $S, G$ | $A/m^2$ | $g^{1/2}/cm^{1/2}\,s^2$ | $g^{1/2}/cm^{3/2}\,s$ | $3 \cdot 10^5$ | $10^{-5}$ |
| Elektr. Leitwert | $G$ | $A^2s^3/kg\,m^2 = A/V = S$ | $cm/s$ | $s/cm$ | $9 \cdot 10^{11}$ | $10^{-9}$ |
| Elektr. Leitfähigkeit | $\varkappa$ | $A^2s^3/kg\,m^3 = S/m$ | $1/s$ | $s/cm^2$ | $9 \cdot 10^9$ | $10^{-11}$ |
| Elektr. Widerstand | $R$ | $kg\,m^2/s^3A^2 = V/A = \Omega$ | $s/cm$ | $cm/s$ | $0{,}111 \cdot 10^{-11}$ | $10^9$ |
| Spezif. elektr. Widerst. | $\varrho$ | $kg\,m^3/s^3A^2 = \Omega m$ | $s$ | $cm^2/s$ | $0{,}111 \cdot 10^{-9}$ | $10^{11}$ |
| Kraft | $F, P, K$ | $kg\,m/s^2 = Ws/m = N$ | $g\,cm/s^2$ | $g\,cm/s^2 = dyn$ | $10^5$ | $10^5$ |
| Arbeit, Energie | $A, W, E$ | $kg\,m^2/s^2 = Nm = Ws = J$ | $g\,cm^2/s^2$ | $g\,cm^2/s^2 = erg$ | $10^7$ | $10^7$ |
| Leistung | $P, S, Q$ | $kg\,m^2/s^3 = J/s = VA = W$ | $g\,cm^2/s^3$ | $g\,cm^2/s^3 = erg/s$ | $10^7$ | $10^7$ |
| Magnet. Spannung | $V$ | $A$ | $g^{1/2}\,cm^{3/2}/s^2$ | $g^{1/2}\,cm^{1/2}/s = Gb$ | $3{,}770 \cdot 10^{10}$ | $1{,}257$ |
| Magnet. Feldstärke | $\boldsymbol{H}$ | $A/m$ | $g^{1/2}\,cm^{1/2}/s^2$ | $g^{1/2}/cm^{1/2}\,s = Oe$ | $3{,}770 \cdot 10^8$ | $1{,}257 \cdot 10^{-2}$ |
| Magnet. Fluß | $\Phi, \Psi$ | $kg\,m^2/s^2A = J/A = Vs = Wb$ | $g^{1/2}\,cm^{1/2}$ | $g^{1/2}\,cm^{3/2}/s = M$ | $0{,}333 \cdot 10^{-2}$ | $10^8$ |
| Magnet. Induktion | $\boldsymbol{B}$ | $kg/s^2A = Vs/m^2 = T$ | $g^{1/2}/cm^{3/2}$ | $g^{1/2}/cm^{1/2}\,s = G$ | $0{,}333 \cdot 10^{-6}$ | $10^4$ |
| Induktivität | $L$ | $kg\,m^2/s^2A^2 = J/A^2 = \Omega s = H$ | $s^2/cm$ | $cm$ | $0{,}111 \cdot 10^{-11}$ | $10^9$ |
| Absol. Permeabilität | $\mu$ | $kg\,m/s^2A^2 = H/m$ | $s^2/cm^2$ | $g^0\,cm^0\,s^0$ | $0{,}8854 \cdot 10^{-15}$ | $0{,}796 \cdot 10^6$ |
| Magnet. Leitwert | $\Lambda$ | $kg\,m^2/s^2A^2 = J/A^2 = \Omega s = H$ | $s^2/cm$ | $cm$ | $0{,}111 \cdot 10^{-11}$ | $10^9$ |

Umrechnung nichtkohärenter Einheiten s. Tafel 9, S. 7.

**Tafel 5** Festsetzungen der seit 1948 international geltenden (absoluten) praktischen Einheiten und der früheren internationalen Einheiten (mit Index int)

A und V beruhen auf dem m-Prototyp, dem kg-Prototyp, der s und der Induktionskonstante $\mu_0$.

$$\mu_0 = \frac{4\pi}{10^7}\,\frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{Am}}$$

(s. auch Tafel 6)

ist festgelegt, und exakt soll gelten:

$$1\ \mathrm{VAs} = 1\ \mathrm{J} = 1\ \mathrm{Nm} = 1\ \mathrm{kg\,m^2/s^2},$$

$$1\,\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{A}} = 1\,\Omega = \mu_0\,\frac{10^7}{4\pi}\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}.$$

Daraus folgt:

$$1\ \mathrm{A} = \sqrt{\frac{4\pi\,\mathrm{N}}{10^7\,\mu_0}} = \frac{1}{\mathrm{s}}\sqrt{\frac{4\pi\,\mathrm{kgm}}{10^7\,\mu_0}}$$

$$1\ \mathrm{V} = \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\sqrt{\frac{10^7\,\mu_0\,\mathrm{N}}{4\pi}} = \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}\sqrt{\frac{10^7\,\mu_0\,\mathrm{kgm}}{4\pi}}$$

Spannung des Weston-Normalelementes: 1,01865 V bei 20 °C

$1\ \mathrm{A_{int}}$ ist der Strom, der beim Durchgang durch eine wäßrige $AgNO_3$-Lösung unter bestimmten Bedingungen in 1 s 1,11800 mg Ag niederschlägt.

$1\ \Omega_{\mathrm{int}}$ ist der Widerstand, den eine Hg-Säule von 106,300 cm Länge, 14,4521 g Masse und durchweg gleichem Querschnitt bei 0 °C hat.

$1\ \mathrm{V_{int}} = 1\ \mathrm{A_{int}} \cdot 1\ \Omega_{\mathrm{int}}$. Das $\mathrm{V_{int}}$ ist also eine abgeleitete Einheit. Als Subnormal dient das Weston-Normalelement mit 1,01830 $\mathrm{V_{int}}$ bei 20 °C.

Umrechnungen:

$$\begin{aligned} 1\ \mathrm{A_{int}} &= 0{,}99985\ \mathrm{A} \\ 1\ \Omega_{\mathrm{int}} &= 1{,}00049\ \Omega \\ 1\ \mathrm{S_{int}} &= 0{,}99951\ \mathrm{S} \\ 1\ \mathrm{V_{int}} &= 1{,}00034\ \mathrm{V} \\ 1\ \mathrm{W_{int}} &= 1{,}00019\ \mathrm{W} \end{aligned}$$

**Tafel 6** Permeabilität und Dielektrizitätskonstante (DK)

$$\mu_0 = \frac{4\pi}{10^7}\,\frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{Am}} = \frac{4\pi}{10^7}\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{A^2}} = \frac{4\pi}{10^7}\,\frac{\mathrm{H}}{\mathrm{m}}$$

$$= 1{,}256637\ldots \cdot 10^{-6}\,\frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{Am}}$$

$$\left(\mu_0 = 1{,}25602 \cdot 10^{-6}\,\frac{\mathrm{V_{int}\,s}}{\mathrm{A_{int}\,m}}\right)$$

Absolute Permeabilität des leeren Raumes, Induktionskonstante, Magnetische Feldkonstante

$\mu = \dfrac{\boldsymbol{B}}{\boldsymbol{H}}\,\dfrac{\mathrm{H}}{\mathrm{m}}$ Absolute Permeabilität

$\mu_r = \dfrac{\mu}{\mu_0}$ Relative Permeabilität, Permeabilitätszahl

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{\mu_0\,c_0^2}\,\frac{\mathrm{As}}{\mathrm{Vm}} = \frac{1}{\mu_0\,c_0^2}\,\frac{\mathrm{F}}{\mathrm{m}};$$

mit $c_0 \approx 2{,}99792 \cdot 10^8\,\dfrac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$ ist

$$\varepsilon_0 \approx 0{,}88542 \cdot 10^{-11}\,\frac{\mathrm{As}}{\mathrm{Vm}}$$

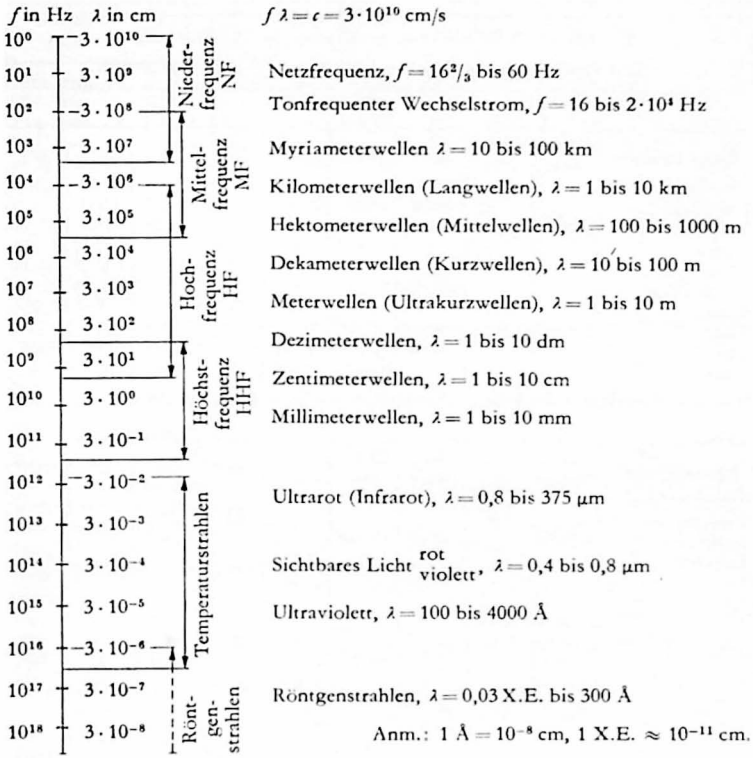
$$\left(\varepsilon_0 = 0{,}88586 \cdot 10^{-11}\,\frac{\mathrm{A_{int}\,s}}{\mathrm{V_{int}\,m}}\right)$$

Absolute Dielektrizitätskonst. des leeren Raumes, Influenzkonstante, Feldkonstante

$\varepsilon = \dfrac{\boldsymbol{D}}{\boldsymbol{E}}\,\dfrac{\mathrm{F}}{\mathrm{m}}$ Absolute Dielektrizitätskonstante

$\varepsilon_r = \dfrac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$ Relative Dielektrizitätskonst., Dielektrizitätszahl

**Tafel 7** Frequenzen und Wellenlängen elektromagnetischer Schwingungen




**Tafel 8** Bezeichnung dekadisch vervielfachter Einheiten

| Vorsatzsilbe | Kurzzeichen | Vielfaches | | Vorsatzsilbe | Kurzzeichen | Teil | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Potenz | Name | | | Potenz | Name |
| Tera | T | $10^{12}$ | Billion[1]) | Piko | p | $10^{-12}$ | Billionstel[1]) |
| Giga | G | $10^{9}$ | Milliarde[1]) | Nano | n | $10^{-9}$ | Milliardstel[1]) |
| Mega | M | $10^{6}$ | Million | Mikro | µ | $10^{-6}$ | Millionstel |
| Kilo | k | $10^{3}$ | Tausend | Milli | m | $10^{-3}$ | Tausendstel |
| Hekto | h | $10^{2}$ | Hundert | Zenti | c | $10^{-2}$ | Hundertstel |
| Deka | da | $10^{1}$ | Zehn | Dezi | d | $10^{-1}$ | Zehntel |

[1]) In den USA wird $10^{9}$ mit Billion und $10^{12}$ mit Trillion bezeichnet.

## Tafel 9 Umrechnung deutscher, englischer und amerikanischer Einheiten

1″ engl. = 25,399956 mm 1″ amer. = 25,400051 mm
Für industrielle Messungen ist vereinbart: 1″ = 25,400000 mm

| Längeneinheit | naut. mile | stat. mile | yard | foot | inch | line | km | m | cm |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 nautical mile[1]) | 1 | 1,152 | 2027 | 6080 | 72960 | | 1,852 | 1852 | |
| 1 statute mile | 0,8684 | 1 | 1760 | 5280 | 63360 | | 1,609 | 1609 | |
| 1 yard | | | 1 | 3 | 36 | 360 | | 0,9144 | 91,44 |
| 1 foot (Fuß, ′) | | | 0,3333 | 1 | 12 | 120 | | 0,3048 | 30,48 |
| 1 inch (Zoll, ″) | | | 0,0278 | 0,0833 | 1 | 10 | | 0,0254 | 2,54 |
| 1 line | | | | | $10^{-1}$ | 1 | | | 0,254 |
| 1 km | 0,5396 | 0,6214 | 1093,6 | 3281 | 39370 | | 1 | $10^{3}$ | $10^{5}$ |
| 1 m | | | 1,094 | 3,281 | 39,37 | | $10^{-3}$ | 1 | $10^{2}$ |
| 1 cm | | | | 0,0328 | 0,3937 | | $10^{-5}$ | $10^{-2}$ | 1 |

[1]) 1 nautical mile = 1 Seemeile; 1 Seemeile/h (sm/h) = 1 Knoten (kn).

| Flächeneinheit | sq. mile | acre | sq. yard | sq. foot | sq. inch | km² | ha | m² | cm² |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 square mile | 1 | 640 | | | | 2,59 | 259 | | |
| 1 acre | 0,0016 | 1 | 4840 | 43560 | | | 0,405 | 4047 | |
| 1 square yard | | | 1 | 9 | 1296 | | | 0,8361 | 8361 |
| 1 square foot | | | 0,1111 | 1 | 144 | | | 0,0929 | 929 |
| 1 square inch | | | | | 1 | | | | 6,452 |
| 1 km² | 0,3861 | 247,1 | | | | 1 | $10^{2}$ | $10^{6}$ | $10^{10}$ |
| 1 ha (100 a) | 0,0039 | 2,47 | | | | $10^{-2}$ | 1 | $10^{4}$ | $10^{8}$ |
| 1 m² | | | 1,196 | 10,76 | 1550 | $10^{-6}$ | $10^{-4}$ | 1 | $10^{4}$ |
| 1 cm² | | | | | 0,155 | $10^{-10}$ | $10^{-8}$ | $10^{-4}$ | 1 |

| Raumeinheit | cu. yard | cu. foot | cu. inch | Imp. gallon | U.S. gallon | Imp. fl. oz | U.S. fl. oz | dm³ (l) | cm³ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 cubic yard | 1 | 27 | 46656 | 168,2 | 202 | 26909 | 25853 | 764,6 | |
| 1 cubic foot | 0,0370 | 1 | 1728 | 6,232 | 7,481 | 996,6 | 957,5 | 28,32 | |
| 1 cubic inch | | | 1 | | | 0,5768 | 0,5541 | 0,0164 | 16,39 |
| 1 Imp. gallon[1]) | | 0,1603 | 277,4 | 1 | 1,201 | 160 | 153,7 | 4,546 | 4546 |
| 1 U.S. gallon[1]) | | 0,1337 | 231 | 0,8327 | 1 | 133,2 | 128 | 3,785 | 3785 |
| 1 Imp. fl. oz | | | 1,734 | | | 1 | 0,9607 | 0,0284 | 28,41 |
| 1 U.S. fl. oz | | | 1,805 | | | 1,041 | 1 | 0,0296 | 29,57 |
| 1 dm³ | 0,0013 | 0,035 | 61,02 | 0,22 | 0,2642 | 35,3 | 33,81 | 1 | $10^{3}$ |
| 1 cm³ | | | 0,061 | | | 0,0353 | 0,0338 | $10^{-3}$ | 1 |

[1]) 1 gallon = 4 quarts (qt) = 8 pints (pt).

**Tafel 9** (Forts.) Umrechnung deutscher, englischer und amerikanischer Einheiten

| Masse-einheit | Imp. t | U.S. t | Imp. cwt | U.S. cwt | lb | oz | t | kg | g |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 Imp. ton | 1 | 1,120 | 20 | 22,40 | 2240 | 35840 | 1,016 | 1016 | |
| 1 U.S. ton | 0,8929 | 1 | 17,841 | 20 | 2000 | 32000 | 0,907 | 907,2 | |
| 1 Imp. cwt | 0,05 | 0,056 | 1 | 1,12 | 112 | 1792 | 0,0508 | 50,8 | 50802 |
| 1 U.S. cwt | 0,0446 | 0,05 | 0,8929 | 1 | 100 | 1600 | 0,0454 | 45,36 | 45359 |
| 1 avdp. pound | | | 0,009 | 0,01 | 1 | 16 | | 0,454 | 453,6 |
| 1 avdp. ounce[1]) | | | | | 0,0625 | 1 | | 0,028 | 28,35 |
| 1 t | 0,9842 | 1,1023 | 19,685 | 22,05 | 2204,6 | 35274 | 1 | $10^3$ | $10^6$ |
| 1 kg[2]) | | 0,0011 | 0,020 | 0,022 | 2,205 | 35,27 | $10^{-3}$ | 1 | $10^3$ |
| 1 g[2]) | | | | | | 0,0353 | $10^{-6}$ | $10^{-3}$ | 1 |

[1]) 1 avoirdupois ounce = 16 drams = 437,5 grains;
1 troy ounce = 480 grains = 31,1 p.

[2]) Im täglichen Leben und auch in der Technik wird die gehandelte Masse noch gewohnheitsmäßig mit „Gewicht" bezeichnet.

| Druckeinheit | psi | inch of merc. | atm | bar | at | Torr |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 pound per square inch | 1 | 2,036 | 0,0680 | 0,0689 | 0,0703 | 51,715 |
| 1 inch of mercury (Zoll Hg-S) | 0,4911 | 1 | 0,0334 | 0,0338 | 0,0345 | 25,4 |
| 1 atm (physik. Atmosph.) | 14,696 | 29,921 | 1 | 1,0133 | 1,0332 | 760 |
| 1 bar ($10^6$ dyn/cm²) | 14 503 | 29,53 | 0,9869 | 1 | 1,0197 | 750,06 |
| 1 at (tech. Atmosph., 1 kp/cm²) | 14,2233 | 28,959 | 0,9678 | 0,9807 | 1 | 735,56 |
| 1 Torr (≈ 1 mm Hg-S) | 0,01934 | 0,03937 | 0,00132 | 0,00133 | 0,00136 | 1 |

| Arbeits-, Energie-, Wärmemengen-einheit | BTU | HPh | ft-lb | kcal | Nm Ws J | PSh | kpm |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 kWh | 3412 | 1,34 | $2{,}66 \cdot 10^6$ | 859,845 | $3{,}6 \cdot 10^6$ | 1,35962 | 367098 |

| Leistungseinheit | BTU/s | HP | ft-lb/s | kcal/s | kW | PS | kpm/s |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 Brit. Thermal Unit/s | 1 | 1,42 | 778,26 | 0,252 | 1,06 | 1,43 | 108 |
| 1 Horse Power | 0,707 | 1 | 550 | 0,178 | 0,746 | 1,014 | 76,1 |
| 1 foot-pound/s | 0,00129 | 0,00182 | 1 | | 0,00136 | 0,00184 | 0,138 |
| 1 kcal/s | 3,97 | 5,61 | 3088 | 1 | 4,1868 | 5,69 | 426,9 |
| 1 kW ($10^{10}$ erg/s) | 0,948 | 1,34 | 737,54 | 0,2388 | 1 | 1,359 | 102 |
| 1 PS | 0,697 | 0,986 | 542,47 | 0,176 | 0,735 | 1 | 75 |
| 1 kpm/s | 0,0093 | 0,0131 | 7,23 | 0,00234 | 0,00981 | 0,0133 | 1 |

**Tafel 10** Periodisches System der Elemente (bezogen auf $^{12}C$)

| Periode | Gruppe I | Gruppe II | Gruppe III | Gruppe IV | Gruppe V | Gruppe VI | Gruppe VII | Gruppe VIII | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 H 1,00797 | | | | | | | | | | 2 He 4,0026 |
| 2 | 3 Li 6,939 | 4 Be 9,0122 | 5 B 10,811 | 6 C 12,01115 | 7 N 14,0067 | 8 O 15,9994 | 9 F 18,9984 | | | | 10 Ne 20,183 |
| 3 | 11 Na 22,9898 | 12 Mg 24,312 | 13 Al 26,9815 | 14 Si 28,086 | 15 P 30,9738 | 16 S 32,064 | 17 Cl 35,453 | | | | 18 Ar 39,948 |
| 4 | 19 K 39,102 | 20 Ca 40,08 | 21 Sc 44,956 | 22 Ti 47,90 | 23 V 50,942 | 24 Cr 51,996 | 25 Mn 54,9381 | 26 Fe 55,847 | 27 Co 58,9332 | 28 Ni 58,71 | |
| 4 | 29 Cu 63,54 | 30 Zn 65,37 | 31 Ga 69,72 | 32 Ge 72,59 | 33 As 74,9216 | 34 Se 78,96 | 35 Br 79,909 | | | | 36 Kr 83,80 |
| 5 | 37 Rb 85,47 | 38 Sr 87,62 | 39 Y 88,905 | 40 Zr 91,22 | 41 Nb 92,906 | 42 Mo 95,94 | 43 Tc (99) | 44 Ru 101,07 | 45 Rh 102,905 | 46 Pd 106,4 | |
| 5 | 47 Ag 107,870 | 48 Cd 112,40 | 49 In 114,82 | 50 Sn 118,69 | 51 Sb 121,75 | 52 Te 127,60 | 53 J 126,9044 | | | | 54 Xe 131,30 |
| 6 | 55 Cs 132,905 | 56 Ba 137,34 | 57 La 138,91 58-71 | 72 Hf 178,49 | 73 Ta 180,948 | 74 W 183,85 | 75 Re 186,2 | 76 Os 190,2 | 77 Ir 192,2 | 78 Pt 195,09 | |
| 6 | 79 Au 196,967 | 80 Hg 200,59 | 81 Tl 204,37 | 82 Pb 207,19 | 83 Bi 208,980 | 84 Po (210) | 85 At (210) | | | | 86 Rn (222) |
| 7 | 87 Fr (223) | 88 Ra (226) | 89 Ac (227) 90... | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 6 | 58 Ce 140,12 | 59 Pr 140,907 | 60 Nd 144,24 | 61 Pm (145) | 62 Sm 150,35 | 63 Eu 151,96 | 64 Gd 157,25 | 65 Tb 158,924 | 66 Dy 162,50 | 67 Ho 164,930 | 68 Er 167,26 | 69 Tm 168,934 | 70 Yb 173,04 | 71 Lu 174,97 |
| 7 | 90 Th 232,038 | 91 Pa (231) | 92 U 238,03 | 93 Np (237) | 94 Pu (242) | 95 Am (243) | 96 Cm (245) | 97 Bk (249) | 98 Cf (249) | 99 Es (254) | 100 Fm (255) | 101 Md (256) | 102 No (253) | 103 Lw (257) |

**Tafel 11** Elektrochemische Spannungsreihe der Ionenleiter

| Halbzelle | EMK | Halbzelle | EMK | Halbzelle | EMK |
|---|---|---|---|---|---|
| | V | | V | | V |
| $K/K^+$ | −2,925 | $Cd/Cd^{++}$ | −0,402 | $Cu/Cu^{++}$ | 0,337 |
| $Ca/Ca^{++}$ | −2,87 | $In/In^{+++}$ | −0,33 | $Pt(O_2)/OH'$ | 0,401 |
| $Na/Na^+$ | −2,713 | $Co/Co^{++}$ | −0,28 | $Cu/Cu^+$ | 0,521 |
| $Mg/Mg^{++}$ | −2,37 | $Ni/Ni^{++}$ | −0,23 | $As/AsO_2'$ | 0,68 |
| $Ce/Ce^{+++}$ | −2,33 | $Mo/Mo^{+++}$ | −0,2 | $2\,Hg/Hg_2^{++}$ | 0,792 |
| $Al/Al^{+++}$ | −1,66 | $Sn/Sn^{++}$ | −0,140 | $Ag/Ag^+$ | 0,799 |
| $Mn/Mn^{++}$ | −1,190 | $Pb/Pb^{++}$ | −0,126 | $Pt/Pt^{++}$ | 1,2 |
| $Zn/Zn^{++}$ | −0,763 | $H_2/2\,H^+$ | 0,000 | $2\,Cl'/Cl_2$ | 1,359 |
| $Cr/Cr^{+++}$ | −0,74 | $Sb/SbO^+$ | 0,212 | $Au/Au^{+++}$ | 1,5 |
| $Fe/Fe^{++}$ | −0,440 | $Bi/BiO^+$ | 0,32 | $2\,F'/F_2$ | 2,87 |

Anm.: Wäßrige Lösung, $t = 25$ °C, $p = 1$ atm.

**Tafel 12** Thermoelektrische Spannungsreihe der Metalle

| Metall | EMK | Metall | EMK | Metall | EMK |
|---|---|---|---|---|---|
| | mV | | mV | | mV |
| Wismut | −7,70 | Blei | 0,41/0,46 | MANGANIN | 0,57/0,82 |
| KONSTANTAN | −3,47/−3,40 | Magnesium | 0,4 /0,43 | Iridium | 0,65/0,68 |
| Kobalt | −1,99/−1,52 | Aluminium | 0,37/0,41 | Gold | 0,56/0,80 |
| Nickel | −1,94/−1,20 | Wolfram | 0,65/0,90 | Kadmium | 0,85/0,92 |
| Quecksilber | −0,07/+0,04 | Rhodium | 0,65 | Molybdän | 1,16/1,31 |
| Platin | 0,00 | Silber | 0,67/0,79 | Eisen | 1,87/1,89 |
| Graphit | 0,22 | Kupfer | 0,72/0,77 | Chromnickel | 2,20 |
| Tantal | 0,34/0,51 | V2A-Stahl | 0,77 | Antimon | 4,70/4,86 |
| Zinn | 0,4/0,44 | Zink | 0,60/0,79 | Silizium | 44,8 |

Anm.: Die EMK zwischen zwei Metallen ist gleich dem Unterschied zwischen den entsprechenden Werten (bezogen auf $\Delta t = 100$ grd).

**Tafel 13** Cu-Drähte, Abmessungen und Widerstandswerte

| Durchm. | Querschn. | $R/l$ | $l/R$ | Durchm. | Querschn. | $R/l$ | $l/R$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| mm | $mm^2$ | Ω/km | m/Ω | mm | $mm^2$ | Ω/km | m/Ω |
| 0,6 | 0,283 | 61,9 | 16,2 | 1,78 | 2,5 | 7,12 | 140 |
| 0,8 | 0,503 | 34,8 | 28,7 | 2,0 | 3,14 | 5,57 | 180 |
| 1,0 | 0,785 | 22,3 | 44,3 | 2,26 | 4 | 4,45 | 225 |
| 1,2 | 1,131 | 15,5 | 64,7 | 2,76 | 6 | 2,96 | 338 |
| 1,38 | 1,5 | 11,86 | 84,4 | 3,0 | 7,07 | 2,48 | 403 |
| 1,5 | 1,767 | 9,90 | 101 | 3,57 | 10 | 1,78 | 563 |

Anm.: $t = 20$ °C.

**Tafel 14** Eigenschaften elektrischer Leiter

| Werkstoff | Spezifischer Widerstand $\varrho$ bei 20 °C | Leitfähigkeit $\varkappa$ bei 20 °C | Temperaturbeiwert $\alpha$ bei 20 °C | Dichte $d$ bei 18 °C | Längenausdehnungskoeff. zw. 0 u. 100 °C | Symbol |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $\Omega\ mm^2/m$ | $m/\Omega\ mm^2$ | $10^{-3}$/grd | $kg/dm^3$ | $10^{-6}$/grd | |
| **Reine Metalle**[1]) | | | | | | |
| Aluminium | 0,025 | 40,0 | 4,30 | 2,70 | 23,8 | Al |
| Antimon | 0,386 | 2,59 | 5,10 | 6,68 | 10,88 | Sb |
| Blei | 0,188 | 5,32 | 4,00 | 11,34 | 28,0 | Pb |
| Chrom | 0,026 | 38,1 | | 6,92 | 8,5 | Cr |
| Eisen | 0,10 | 10,0 | 5,60 | 7,86 | 12,3 | Fe |
| Gold | 0,020 | 50,0 | 3,92 | 19,3 | 14,2 | Au |
| Iridium | 0,046 | 21,7 | 4,1 | 22,42 | 6,6 | Ir |
| Kadmium | 0,076 | 13,15 | 4,20 | 8,64 | 41,6 | Cd |
| Kupfer | 0,016 | 62,5 | 4,33 | 8,92 | 16,5 | Cu |
| Magnesium | 0,046 | 21,7 | 4,41 | 1,74 | 26,0 | Mg |
| Molybdän | 0,053 | 18,8 | 4,73 | 10,2 | 5,1 | Mo |
| Nickel | 0,061 | 16,4 | 6,92 | 8,90 | 13,0 | Ni |
| Palladium | 0,109 | 9,18 | 3,68 | 11,97 | 11,0 | Pd |
| Platin | 0,098 | 10,2 | 3,92 | 21,45 | 8,99 | Pt |
| Quecksilber | 0,958 | 1,04 | 0,99 | 13,55 | 60,3 | Hg |
| Silber | 0,015 | 66,6 | 4,1 | 10,50 | 19,5 | Ag |
| Tantal | 0,124 | 8,07 | 3,64 | 16,65 | 6,6 | Ta |
| Wismut | 1,2 | 0,83 | 4,40 | 9,80 | 13,5 | Bi |
| Wolfram | 0,049 | 20,4 | 4,82 | 19,3 | 4,50 | W |
| Zink | 0,048 | 20,8 | 4,10 | 7,23 | 26 | Zn |
| Zinn | 0,10 | 10,0 | 4,6 | 7,28 | 26,7 | Sn |

[1]) Verunreinigungen erhöhen $\varrho$ meist schon in kleinen Mengen sehr stark, z. B. auf 0,028 für Leitungs-Al und auf 0,0175 für Leitungs-Cu.

| Werkstoff | Spezifischer Widerstand $\varrho$ bei 20 °C | Leitfähigkeit $\varkappa$ bei 20 °C | Temperaturbeiwert $\alpha$ bei 20 °C | Dichte $d$ bei 18 °C | Längenausdehnungskoeff. zw. 0 u. 100 °C | Zusammensetzung in % |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $\Omega\,mm^2/m$ | $m/\Omega\,mm^2$ | $10^{-3}$/grd | kg/dm³ | $10^{-6}$/grd | |
| **Legierungen** | | | | | | |
| ALDREY | 0,033 | 30,0 | 3,6 | 2,7 | | 99 E Al, 0,5 Mg, 0,5 Si |
| Bronze | 0,18 | 5,56 | 0,5 | 8,1 | 17,5 | 88 Cu, 12 Sn (1 Pb) |
| CEKAS | 1,00 | 1,00 | 0,26 | 8,25 | | Ni, Cr, Fe |
| INVAR | 0,81 | 1,23 | 2,5 | 7,9 | 0,9 | 63,8 Fe, 36 Ni, 0,2 C |
| ISABELLIN | 0,50 | 2,00 | −0,02 | | | 84 Cu, 3 Al, 13 Mn |
| KANTHAL | 1,45 | 0,69 | 0,06 | 7,2 | 16,6 | 72 Fe, 20 Cr, 5 Al, 3 Co |
| KONSTANTAN | 0,50 | 2,04 | −0,03 | 8,8 | 15,2 | 54 Cu, 45 Ni, 1 Mn |
| KRUPPIN | 0,84 | 1,19 | 0,8 | | | 30 Ni |
| MANGANIN | 0,42 | 2,32 | 0,01 | 8,4 | 17,5 | 86 Cu, 2 Ni, 12 Mn |
| MEGAPYR | 1,40 | 0,72 | 0,07 | | | 65 Fe, 30 Cr, 5 Al |
| Messing | 0,063 | 15,9 | 1,6 | 8,4 | 18,4 | 66 Cu, 34 Zn |
| Neusilber | 0,30 | 3,33 | 0,35 | 8,5 | 18,36 | 60 Cu, 17 Ni, 23 Zn |
| Ni Cr 80 20 | 1,09 | 0,92 | 0,04 | 8,4 | 14 | ≈80 Ni, ≈20 Cr, Fe, Si, Mn |
| NICKELIN | 0,43 | 2,32 | 0,23 | 8,7 | | 54 Cu, 26 Ni, 20 Zn |
| Platiniridium | 0,32 | 3,13 | 2 | | 9 | 90 Pt, 10 Ir |
| Platinrhodium | 0,20 | 5,00 | 1,7 | 21,6 | | 90 Pt, 10 Rh |
| Platinsilber | 0,20 | 5,00 | 0,3 | 19,3 | | 20 Pt, 80 Ag |
| Wood-Metall | 0,54 | 1,85 | 2,4 | 9,7 | | 56 Bi, 14 Sn, 14 Pb, 16 Cd |
| **Halbleiter** | | | | | | |
| Graphit | 22 | 0,046 | −1,3 | 2,25 | 7,86 | C |
| Retortengraphit | 70 | 0,014 | −0,4 | | | C |
| SILIT | 1000 | 0,001 | | 2 | | Si C |

**Tafel 15** Eigenschaften magnetisch weicher Werkstoffe

| Werkstoff | Relative (Anfangs-) Permeabilität $\mu_A$ | Relative (Maximal-) Permeabilität $\mu_{max}$ | Koerzitivfeldstärke $H_c$ | Sättigungsmagnetisierung $J_\infty$ | Spezifischer Widerstand $\varrho$ | Zusammensetzung in % |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Oe | Oe | Ω mm²/m | Gew.-% |
| **Technisch reines Eisen** | | | | | | |
| Holzkohleneisen (geglüht) | ≈ 470 | 6400 | 0,76 | 21500 | 0,12 | Fe, < 0,1 C |
| Magnetreineisen, gesintert | bis 1000 | bis 30000 | 0,1 bis 0,5 | 22000 | 0,1 | Fe, < 0,1 C |
| **Siliziumhaltige Stähle** | | | | | | |
| Dynamoblech I | 150 | 2000 bis 5000 | 1,5 | 21000 | 0,15 bis 0,22 | Fe, 0,7 Si |
| Dynamoblech II | ≈ 180 | 2000 bis 5000 | 1,3 | 20000 | 0,33 | Fe, 1 Si |
| Dynamoblech III | ≈ 230 | 3000 bis 6000 | 1 | 19500 | 0,46 | Fe, 1,7 bis 2,7 Si |
| Dynamoblech IV | 400 bis 600 | 4000 bis 6000 | 0,4 bis 0,5 | 19000 | 0,55 | Fe, 3,4 bis 4,3 Si |
| HYPERM 1, 3 und 7 / TRAFOPERM N1 | 550 bis > 1500 | 7000 bis 11200 | < 0,15 bis 1,1 | ≈ 20000 | 0,40 bis 0,55 | Fe, 2,7 bis 4 Si |
| TRAFOPERM N2 | | 35000 | 0,25 | 20300 | 0,4 | Fe, 2,7 Si |
| **Aluminiumhalt. Werkst.** | | | | | | |
| SENDUST | 40000 | 120000 | 0,02 bis 0,2 | 11000 | 0,6 bis 0,8 | Fe, 5,5 Al, 9,5 Si |
| **Nickelhaltige Werkstoffe** | | | | | | |
| HYPERM 36,40; PERMENORM 3601 | 2000 bis 2500 | 7000 bis 14000 | 0,1 bis 0,5 | 13000 | 0,65 bis 0,75 | Fe, 36 bis 40 Ni |
| 50%NiFe; HYPERM50F1 / PERMENORM 5000 H2 | ≈ 4000 | 20000 bis 50000 | 0,06 bis 0,12 | 15500 | 0,45 | Fe, 50 Ni |
| DELTAMAX; 5000 Z | 300 bis 1700 | 50000 bis 250000 | 0,16 bis 0,4 | 13500 bis 16000 | 0,45 | Fe 50 Ni |
| PERMALLOY C / MUMETALL E3 | 20000 | $10^5$ bis $2{,}5 \cdot 10^5$ | 0,03 bis 0,09 | 8000 bis 9000 | 0,5 bis 0,55 | Fe, 79 Ni, 3 bis 4 Mo<br>Fe, 77 Ni, 5 Cu, 2 Cr |
| M 1040 | $6 \cdot 10^4$ | 90000 | 0,01 | 6200 | 0,55 | Fe, 72 Ni, 14 Cu, 3 Mo |
| ULTRAPERM 10 | $10^5$ | $\approx 4 \cdot 10^5$ | 0,007 | 8000 | 0,6 | Fe, 79 Ni, 5 Mo |

**Tafel 16** Eigenschaften von Dauermagnet-Werkstoffen

| Werkstoff | Koerzitiv-feldstärke $_BH_c$ | Remanenz $B_r$ | Feldstärke im günstigsten Arbeitspunkt $H_a$ | Induktion im günstigsten Arbeitspunkt $B_a$ | Zusammensetzung |
|---|---|---|---|---|---|
| | Oe | G | Oe | G | Gew.-% |
| **Martensitische Stähle** | | | | | |
| Co 040 | 70 | 9400 | 49 | 6500 | Fe, 1 C, < 2,1 Co, < 4 Cr, < 0,7 W |
| Co 050 | 120 | 8400 | 75 | 5300 | Fe, 1 C, < 6,5 Co, < 8,5 Cr, < 1,3 Mo |
| Co 060 | 155 | 8400 | 100 | 5300 | Fe, 1 C, < 11 Co, < 8,5 Cr, < 1,6 Mo |
| Co 070 | 180 | 8400 | 115 | 5300 | Fe, 1 C, < 16 Co, < 9 Cr, < 1,6 Mo |
| Co 090 | 230 | 8400 | 150 | 5300 | Fe, 1C, <31Co, <4,7Cr, <0,4Mo, <4,8W |
| **Ausscheidungsgehärtete Stähle** | | | | | |
| Al Ni 090 gegossen od. gesintert | 260 | 7400 | 160 | 5200 | Fe, < 12 Al, < 22 Ni |
| Al Ni 120 gegossen od. gesintert | 480 | 5400 | 300 | 3400 | Fe, < 13 Al, < 27,5 Ni, (2 bis 5 Cu) |
| Al Ni Co 160 gegossen od. gesintert | 630 | 6400 | 350 | 4000 | Fe, < 11,5 Al, < 24,5 Ni, < 10 Co, < 4 Cu |
| Al Ni Co 400 (Vorzugsrichtung) | 550 | 10500 | 400 | 8000 | Fe, < 9 Al, < 15,5 Ni, < 24 Co, < 4 Cu |
| REMALLOY | 250 | 10000 | 170 | 6000 | Fe, 12 Co, 16 Mo |
| VICALLOY II (Vorzugsrichtung) | 520 | 10000 | 350 | 8000 | Fe, 52 Co, < 14 V |
| Pt Co 380 | 2600 | 4500 | 1500 | 2500 | 77 Pt, 23 Co |
| Cu Ni Fe 1 (Vorzugsrichtung) | 575 | 5600 | 320 | 4500 | Fe, 60 Cu, 20 Ni |
| Co Ni Cu A | 232 | 6250 | 159 | 4270 | 49 Co, 26 Ni, 25 Cu |
| Co Ni Cu C | 444 | 5300 | 288 | 3450 | 41 Co, 24 Ni, 35 Cu |
| Co Ni Cu E | 675 | 3400 | 395 | 1930 | 29 Co, 21 Ni, 50 Cu |
| **Pulvermagnete** | | | | | |
| Oxydmagnet | 900 | 1600 | 530 | 900 | 44 $Fe_2O_4$, 30 $Fe_2O_3$, 26 $Co_2O_3$ |
| **Silberlegierung** | | | | | |
| SILMANAL | 575 | 600 | | 290 | 86,8 Ag, 8,8 Mn, 4,4 Al |

**Tafel 17** Eigenschaften elektrischer Isolierstoffe I [1])

| Werkstoff | Spezifischer Widerstand $\varrho$ bei 20 °C | Rel. Dielektrizitätskonstante bei 20 °C $\varepsilon_r$ | Verlustfaktor ($f \approx 1$ kHz) tan $\delta$ | Durchschlagsfestigkeit bei 20 °C | Dichte $d$ bei 18 °C | Anmerkung |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Ω cm | | $\cdot 10^{-3}$ | kV/cm (Eff.-Wert) | kg/dm³ | [1]) s. auch Tafel 18 |
| | | | | | | [2]) $f \approx 1$ MHz |
| Aluminium- und Magnesiumsilikate | | | | | | [3]) ARDOSTAN |
| KER 410 [3]) | $10^{11}$ bis $10^{12}$ | $\approx 5$ | 4 bis 7 [2]) | 100 bis 200 | 2,1 bis 2,2 | SIEMATHERM |
| Bernstein | $> 10^{18}$ | 2,8 | 5 [2]) | 520 bis 750 | 1,05 bis 1,1 | SIPA H |
| Glimmer | $10^{15}$ bis $10^{17}$ | 6,5 bis 8 | 0,1 bis 1 | 600 bis 2000 | 2,6 | ROSALTHERM I |
| Gummi | $10^{15}$ bis $10^{16}$ | 2,1 bis 2,9 | 2 bis 10 | 160 bis 500 | 0,92 bis 0,96 | [4]) CALIT |
| Hartgewebe (-tafel) | $10^{10}$ bis $10^{12}$ | 5 bis 8 | 40 bis 80 | 60 bis 360 | 1,3 bis 1,4 | DELTAN, K 6 |
| Hartgummi | $10^{15}$ bis $10^{16}$ | 2,3 bis 3,5 | 2,5 bis 25 | 150 bis 400 | 1,15 | ELIT |
| Hartpapier (-tafel) | $10^{12}$ bis $10^{14}$ | 3,6 bis 7 | 30 bis 100 | 200 bis 290 | 1,3 bis 1,45 | FREQUENTA |
| Hart-, Preßporzellan | $10^{11}$ bis $10^{12}$ | 5 bis 6,5 | 6 bis 12 [2]) | 340 bis 380 | 2,3 bis 2,5 | ROSALT 7 |
| Luft, trocken | | 1 | | 24 | 0,001293 | [5]) CONDENSA C u. F |
| Magnesiumsilikate | | | | | | DIELAN, K 90 |
| KER 221 [4]) | $10^{12}$ bis $10^{13}$ | $\approx 6$ | 0,8 bis 1,2 | 300 bis 450 | 2,6 bis 2,8 | SIRUTIT |
| Papier, paraffiniert | | 2,5 bis 4 | 3 bis 10 | 400 bis 500 | | KERAFAR U |
| Papier, technisch | | 1,8 bis 2,6 | 4 bis 7 | 180 bis 220 | | ROSALT 85 |
| Paraffin | $10^{16}$ bis $10^{18}$ | 1,9 bis 2,2 | 0,08 | 140 bis 450 | 0,86 bis 0,93 | [6]) CONDENSA N |
| Quarz | $10^{14}$ bis $3 \cdot 10^{16}$ | 1,7 bis 4,4 | 0,1 [2]) | | 2,7 | KERAFAR W |
| Quarzglas | $10^{15}$ bis $10^{19}$ | 4,2 | 0,5 | 250 bis 400 | 2,2 | ROSALT 50 |
| Rutilhaltige Massen | | | | | | [7]) TEMPA S u. W |
| KER 310 [5]) | $10^{13}$ | 60 bis 100 | 0,3 bis 1 | 100 bis 200 | 3,5 bis 3,9 | THERMAN Z, K 20 |
| KER 311 [6]) | $10^{13}$ | 40 bis 60 | 0,3 bis 6,5 | 100 bis 200 | 3,5 bis 3,9 | DIACOND Null |
| Titanat-Massen | | | | | | ROSALT 15 |
| KER 320 [7]) | $10^{13}$ | 12 bis 20 | 0,3 bis 2 | 100 bis 200 | 3,1 bis 3,2 | [8]) TEMPA T u. X |
| KER 330 [8]) | $10^{13}$ | 30 bis 50 | 0,2 bis 20 | 100 bis 200 | 4 bis 5 | THERMAN L, K 40 |
| KER 331 [9]) | $10^{13}$ | 30 bis 50 | 2,5 bis 7 | 100 bis 200 | 4,8 bis 5,3 | KONSTIT 100 |
| Transformatorenöl | | 2,2 bis 2,5 | 1 | 125 bis 230 [10]) | 0,84 | KERAFAR X |
| | | | | | | ROSALT 40 u. 42 |
| | | | | | | [9]) TEMPA U |
| | | | | | | THERMAN X, K 35 |
| | | | | | | KONSTIT 200 |
| | | | | | | [10]) wasserfrei |

# Tafel 18

## Eigenschaften elektrischer Isolierstoffe II

≈ Durchschnittswert
≈ Höchstwert
≈ Tiefstwert

x Stoffe zu elastisch
\+ beständig
O bedingt beständig
– unbeständig

| | | | Dichte g/cm³ | Biegefestigkeit kp/cm² | Schlagzähigkeit kpcm/cm² | Kerbschlagzähigkeit kpcm/cm² | Zugfestigkeit kp/cm² | Druckfestigkeit kp/cm² | Elastizitätsmodul kp/cm² | Warmformbeständigkeit nach Martens °C | Warmformbeständigkeit nach Vicat °C | Höchstzulässige Betriebstemperatur °C | Längenausdehnungskoeffizient $10^{-5}$/grd | Wärmeleitzahl kcal/m h grd | Durchschlagsfestigkeit kV/mm | Spezifischer Widerstand Ω cm | Rel. Dielektrizitätskonst. bei 800 Hz | Verlustfaktor tan δ · $10^4$ bei 800 Hz | Wasseraufnahme mg/100cm² 7 Tage | Chem. Beständigkeit gegen: Schwache Säuren | Starke Säuren | Schwache Laugen | Starke Laugen | Alkohole | Chlorkohlenwasserstoffe | Benzol | Benzin | Mineralöl | tierische u. pflanzliche Öle |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Formpreßstoffe | Phenoplast-Preßmassen mit anorganischem Füllstoff (Typ 11, 12, 16) | Typ 11<br>Typ 12<br>Typ 16 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Phenoplast-Preßmassen mit organischem Füllstoff (Typ 31, 51, 54, 71, 74) | Typ 31<br>Typ 51<br>Typ 54<br>Typ 71<br>Typ 74 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Harnstoffharz-Preßmassen mit organischem Füllstoff (Typ 130, 131) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Melaminharz-Preßmassen mit organischem Füllstoff (Typ 150, 152) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Schichtpreßst. | Hartpapier mit Phenolharz | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Hartgewebe mit Phenolharz | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Polyester-Glasgewebe-Schichtstoff | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Thermoplaste und andere Spritzgußmassen | Polyäthylen (Hochdruck Lupolen H, Trolen) (Niederdruck Hostalen, RCH-Polyäthylen) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Polypropylen (Hostalen PPH, PPN, Moplen) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Polyvinylchlorid (PVC, Vestolit, Vinnol, Trovidur, Vinidur) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Polystyrol 1. rein (Polystyrol bzw. Trolitul III, VI) | III<br>VI | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Polystyrol 2. Mischpolymerisat (Polystyrol 475, EH, 52) | 475<br>EH<br>52 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Polyvinylcarbazol (Luvican) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Polymethacrylsäureester (Plexiglas, Plexigum) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Polycarbonat (Makrolon, Lexan) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Polytetrafluoräthylen (Fluon, Teflon, Hostaflon TF) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Polytrifluormonochloräthylen (Hostaflon C, Fluorothene, Kel-F) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Celluloseacetat (Cellidor, Ecarit, Trolit) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Polyamid (Ultramid A, B, Durethan BK) (Ultramid S, Rilsan) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Polyurethan (Düretan U, Ultramid U) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Azetalharz (Delrin) Hostaform C | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Gießharze | Äthoxylin-(Epoxyd-)Harz (Araldit) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Polyestergießharz (Leguval, Palatal, Polylelt) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

# II. Grundgleichungen und Grundbegriffe der Elektrotechnik und des Magnetismus

## Grundgleichungen der Elektrotechnik

*Widerstand*

Elektrischer Leiter bei $t = 20\ °C$ $\quad R = \frac{\varrho\, l}{A} = \frac{l}{\varkappa A}$

bei $t \gtrless 20\ °C$ $\quad R \approx \frac{l}{A}\varrho\,[1 + \alpha\,(t - 20\ °C)]$

$\varrho, \varkappa, \alpha$ s. Tafel 14, S. 10 und 11
$l$ Länge
$A$ Querschnitt

*Induktivität*

Konzentrische Zylinder (konz. Kabel) $\quad L = \mu_r\, l \cdot 2 \cdot \ln\left(\frac{r_a}{r_i}\right)$

Parallele Zylinder (Doppelleitung) $\quad L = \mu_r\, l \cdot 2 \cdot \ln\left(\frac{a^2}{r_1 r_2}\right)$

Zylinder (Einzelleiter) gegen Erde $\quad L = \mu_r\, l \cdot 2 \cdot \ln\left(\frac{2a}{r}\right)$

$\mu^r$ s. Tafel 6, S. 4, sowie Tafel 15, S. 12
$l$ Wirksame Länge
$r_a, r_i$ (Innen-)Radius des Außenzylinders, Radius des Innenzylinders
$r_1, r_2, r$ Radius des Zylinders
Achsenabstand

*Kapazität*

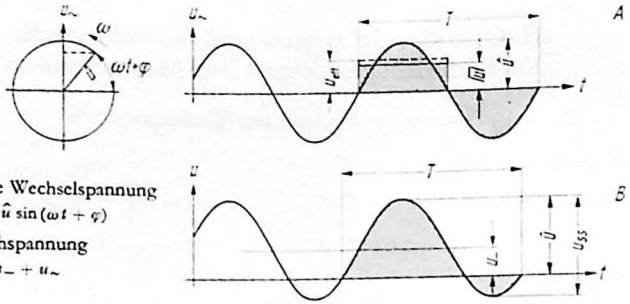
Parallele Platten (Plattenkondensator) $\quad C = (n - 1)\,\frac{\varepsilon_r A}{4\pi a}$

Konzentrische Zylinder (konz. Kabel) $\quad C = \frac{\varepsilon_r\, l}{2 \cdot \ln \frac{r_a}{r_i}}$

Parallele Zylinder (Doppelleitung) $\quad C = \frac{\varepsilon_r\, l}{2 \cdot \ln \frac{a^2}{r_1 r_2}}$

Zylinder (Einzelleiter) gegen Erde $\quad C = \frac{\varepsilon_r\, l}{2 \cdot \ln \frac{2a}{r}}$

$\varepsilon_r$ s. Tafel 6, S. 4, sowie Tafel 17, S. 14, und Tafel 18, S. 15
$n$ Anzahl der Platten
$A$ Wirksame Fläche
$a$ Abstand zweier Flächen; Achsenabstand
$l$ Wirksame Länge
$r_a, r_i$ (Innen-)Radius des Außenzylinders, Radius des Innenzylinders
$r_1, r_2, r$ Radius des Zylinders




*A* Reine Wechselspannung
$u_\sim = \hat{u} \sin(\omega t + \varphi)$

*B* Mischspannung
$u = u_- + u_\sim$

| | |
|---|---|
| $u_\sim$ | Augenblickswert der reinen Wechselspannung sowie des Wechselspannungsanteils der Mischspannung |
| $u$ | Augenblickswert der Mischspannung |
| $u_-$ | Gleichspannungsanteil der Mischspannung, Gleichwert $(u_- = \overline{u} = U)$ |
| $\hat{u}$ | Scheitelwert, Amplitude $(\hat{u} = u_{\max})$ |
| $u_{ss}$ | Schwingungsbreite, Schwankung $(u_{ss} = u_{pp} = \Delta u)$ |
| $\overline{\lvert u \rvert}$ | Gleichrichtwert |
| $u_{\text{eff}}$ | Effektivwert $(u_{\text{eff}} = \tilde{u} = U)$ |
| $T$ | Schwingungsdauer einer Periode $\quad f = \frac{1}{T} = T^{-1}$ Frequenz |
| $(\omega t + \varphi)$ | Phasenwinkel $\quad t$ Zeit $\quad \varphi$ Nullphasenwinkel |
| $\omega = 2\pi f$ | Winkelgeschwindigkeit, Kreisfrequenz |

| | | Werte für reine Wechselspannung |
|---|---|---|
| $u_- = \overline{u} = \frac{1}{T}\int_0^T u \, dt$ | Zeitl. linearer (arithm.) Mittelw., Gleichwert | 0 |
| $\overline{\lvert u \rvert} = \frac{1}{T}\int_0^T \lvert u \rvert \, dt$ | Zeitl. linearer Mittelw. d. Betrages, Gleichrichtwert | $\frac{2\sqrt{2}}{\pi} u_{\text{eff}} = 0{,}900\, u_{\text{eff}}$ |
| $u_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T u^2 \, dt}$ | Zeitlich. quadrat. Mittelwert, Effektivwert | $\frac{\hat{u}}{\sqrt{2}} = 0{,}7071\, \hat{u}$ |
| $\frac{u}{u_{\text{eff}}}$ | Scheitelfaktor | $\sqrt{2} = 1{,}4142$ |
| $\frac{u_{\text{eff}}}{\overline{\lvert u \rvert}}$ | Formfaktor | $\frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1{,}1107$ |

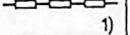
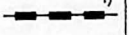
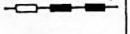
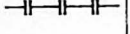
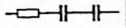
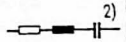
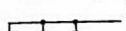
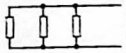
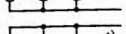


Bild 1 Periodische Vorgänge (Spannungen als Beispiele)

# Ohmsches Gesetz für Gleich- und Wechselstrom

| Größe | Gleichstrom | Wechselstrom | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Einphasen-Wechselstrom | Drehstrom | | Einphasen-Wechselstrom Drehstrom Y und Δ (Schein ... entspr. einsetzen) | |
| | | | Stern Y | Dreieck Δ | | |
| | (Wirk-) | Schein- | Schein- | Schein- | Wirk- | Blind- |
| Spannung | $U = R\,I$ | $U = Z\,I$ | $U_{ML} = Z\,I$ | $U_L = \sqrt{3}\,Z\,I$ | $U_w = U\cos\varphi$ | $U_b = U\sin\varphi$ |
| Strom | $I = \frac{U}{R}$ | $I = \frac{U}{Z}$ | $I = \frac{U_{ML}}{Z}$ | $I = \frac{U_L}{\sqrt{3}\,Z}$ | $I_w = I\cos\varphi$ | $I_b = I\sin\varphi$ |
| Widerstand | $R = \frac{U}{I}$ (ohmscher Widerstand) | $Z = \frac{U}{I}$ | $Z = \frac{U_{ML}}{I}$ (Impedanz) | $Z = \frac{U_L}{\sqrt{3}\,I}$ | $R = Z\cos\varphi$ (Resistanz) | $X = Z\sin\varphi$ (Reaktanz) |
| | | | | | | $X_l = \omega L$ (Induktanz) |
| | | | | | | $X_c = \frac{1}{\omega C}$ (Kondensanz) |
| Leitwert | $G = \frac{1}{R} = \frac{I}{U}$ | $Y = \frac{1}{Z} = \frac{I}{U}$ | $Y = \frac{1}{Z} = \frac{I}{U_{ML}}$ (Admittanz) | $Y = \frac{1}{Z} = \frac{\sqrt{3}\,I}{U_L}$ | $G = Y\cos\varphi$ (Konduktanz) | $B = Y\sin\varphi$ |
| | | | | | | $B_l = \frac{1}{\omega L}$ (Suszeptanz) |
| | | | | | | $B_c = \omega C$ (Kapazitanz) |
| Leistung | $P = U\,I$ (in W) | $S = P_s = U\,I$ | $S = P_s = 3\,U_{ML}\,I$ (in W oder VA) | $S = P_s = \sqrt{3}\,U_L\,I$ | $P = S\cos\varphi$ (in W) | $Q = P_q = S\sin\varphi$ (in W oder Var) |

**Tafel 20** Reihen- und Parallelschaltung ohmscher, induktiver und kapazitiver Widerstände

| Schaltung | Gesamtwiderstand Gesamtleitwert | Phasenlage | Verlustfaktor |
|---|---|---|---|
| | $\Sigma R = R_1 + R_2 + R_3$ | $\varphi = 0°$ | |
|  1) | $\Sigma X_1 = \omega (L_1 + L_2 + L_3)$ | $\varphi = 90°$ | $\tan \delta = 0$ |
|  1) | $Z = \sqrt{R^2 + (\Sigma X_1)^2}$ | $\tan \varphi = \dfrac{\Sigma X_1}{R}$ | $\tan \delta = \dfrac{L_1 \cdot \tan \delta_1 + L_2 \cdot \tan \delta_2}{L_1 + L_2}$ |
|  | $\Sigma X_c = \dfrac{1}{\omega}\left(\dfrac{1}{C_1} + \dfrac{1}{C_2} + \dfrac{1}{C_3}\right)$ | $\varphi = 90°$ | $\tan \delta = 0$ |
|  | $Z = \sqrt{R^2 + (\Sigma X_c)^2}$ | $\tan \varphi = \dfrac{-\Sigma X_c}{R}$ | $\tan \delta = \dfrac{\dfrac{\tan \delta_1}{C_1} + \dfrac{\tan \delta_2}{C_2}}{\dfrac{1}{C_1} + \dfrac{1}{C_2}}$ |
|  2) | $Z = \sqrt{R^2 + (X_1 - X_c)^2}$ | $\tan \varphi = \dfrac{X_1 - X_c}{R}$ | |
|  | $\Sigma G = G_1 + G_2 + G_3$ | $\varphi = 0°$ | |
| 1) | $\Sigma B_1 = \dfrac{1}{\omega}\left(\dfrac{1}{L_1} + \dfrac{1}{L_2} + \dfrac{1}{L_3}\right)$ | $\varphi = 90°$ | $\tan \delta = 0$ |
|  1) | $Y = \sqrt{G^2 + (\Sigma B_1)^2}$ | $\tan \varphi = \dfrac{\Sigma B_1}{G}$ | $\tan \delta = \dfrac{\dfrac{\tan \delta_1}{L_1} + \dfrac{\tan \delta_2}{L_2}}{\dfrac{1}{L_1} + \dfrac{1}{L_2}}$ |
|  | $\Sigma B_c = \omega (C_1 + C_2 + C_3)$ | $\varphi = 90°$ | $\tan \delta = 0$ |
|  | $Y = \sqrt{G^2 + (\Sigma B_c)^2}$ | $\tan \varphi = \dfrac{-\Sigma B_c}{G}$ | $\tan \delta = \dfrac{C_1 \cdot \tan \delta_1 + C_2 \cdot \tan \delta_2}{C_1 + C_2}$ |
|  3) | $Y = \sqrt{G^2 + (B_c - B_1)^2}$ | $\tan \varphi = \dfrac{B_c - B_1}{G}$ | |

Stromwärme $A = I^2 R t$
Magnetische Energie einer Spule $A = L I^2/2$
Elektrische Energie eines Kondensators $A = C U^2/2$

[1]) Gegeninduktivität $M = 0$

[2]) Bedingung für Reihenresonanz: $\omega L - \dfrac{1}{\omega C} = 0$; $\omega = 2\pi f = \dfrac{1}{\sqrt{LC}}$

[3]) Bedingung für Parallelresonanz: $\omega C - \dfrac{\omega L}{R^2 + \omega^2 L^2} = 0$;

$\omega = 2\pi f = \sqrt{\dfrac{1}{LC} - \left(\dfrac{R}{L}\right)^2}$. Für schwach gedämpfte Kreise $\left(\dfrac{R}{L}\right)^2 \ll \dfrac{1}{LC}$ gilt[2]).

## Grundgleichungen des Magnetismus

| | |
|---|---|
| Magnetische Feldstärke einer gestreckten Spule | $H = \frac{N I}{l}$ |
| Induzierter Spannungsstoß in einer Spule beim Auf- und Abbau eines Magnetfeldes | $\int U \, \mathrm{d}t = \mu_0 N A H$ |
| Magnetischer (Induktions-)Fluß ($\int U \, \mathrm{d}t$ für $N = 1$) | $\Phi = \mu_0 A H$ |
| Magnetische Induktion | $B = \frac{\int U \, \mathrm{d}t}{N A} = \mu_0 H$ |
| Magnetische Spannung längs der Umrandung einer vom Gesamtstrom durchfluteten Fläche | $V = \int H \, \mathrm{d}s = \Theta = N I$ |
| Magnetischer Widerstand (Reluktanz) | $R = \frac{l}{\mu A}$ |
| Induktivität | $L = \frac{N \Phi}{I}$ |
| Gegeninduktivität | $M = \frac{\Phi_2}{I_1}$ |
| Kraft eines Magnetfeldes auf ein senkrecht zu ihm angeordnetes stromdurchflossenes Leiterstück | $F = B I l$ |
| Kraft zweier stromdurchflossener Leiterstücke aufeinander | $F = \mu_0 \frac{I_1}{2 \pi a} I_2 l$ |
| Tragkraft eines Magnets | $F = \frac{1}{2 \mu_0} B^2 A$ |

Für einen geschlossenen leeren magnetischen Kreis gilt:

$$\Phi = B A = \mu_0 H A = \mu_0 \frac{N I}{l} A = \mu_0 \frac{A}{l} V$$

Für einen geschlossenen, z. B. mit Eisen gefüllten magnetischen Kreis gilt:

$$\Phi = \mu_r \mu_0 \frac{A}{l} V = \mu \frac{V}{l} A = \frac{V}{l/\mu A} = \frac{V}{R} \quad \text{(entspr. dem Ohmschen Gesetz)}$$

$N$ Windungszahl
$I$ Strom
$l$ Spulenlänge
Leiterstücklänge
$A$ Spulenquerschnitt
Magnetstirnfläche
$s$ Weg
$\Theta$ Elektrische Durchflutung
$a$ Abstand
$\mu_0$, $\mu_r$, $\mu$ } s. Tafel 6, S. 4

## Fotoelektrizität

**Äußerer lichtelektrischer Effekt.** Metalle und auch Halbleiter geben bei Lichtabsorption Elektronen ab, d.h., sie könnten an und für sich als Fotoelemente dienen. Zweckmäßigerweise wird man aber diese sogenannten Fotoelektronen absaugen.

Damit die Austrittsarbeit der Elektronen erreicht wird, müssen die auftreffenden Lichtquanten (Photonen) eine Mindestenergie haben; die Frequenz der Strahlung darf ein Minimum nicht unterschreiten. Beim „normalen lichtelektrischen Effekt" nimmt mit steigender Frequenz auch die Zahl der Elektronen zu, beim „selektiven lichtelektrischen Effekt" einiger Metalle und Verbindungen (z.B. Alkali- und Erdalkali-Verbindungen) erreicht sie bei einer bestimmten Frequenz ein Maximum.

Die den Effekt ausnutzenden *Fotozellen* (Vakuumzellen oder edelgasgefüllte Zellen, meist mit einer Cs- oder Cd-Kathode) arbeiten mit einer Hilfsspannung von etwa 100 V; man benutzt derartige „Fotodioden" als Steuerorgane.

*Fotomultiplier* (Sekundärelektronen-Vervielfacher) sind Vakuumröhren, in denen die aus der Sb-Cs-Fotokathode austretenden Fotoelektronen vermehrt werden: Sie prallen unter dem Einfluß eines elektrischen Feldes auf die erste Dynode (nachgeschaltete Elektrode aus z.B. Cs/Cu-Be- oder Cs/Ag-Mg-Legierung), wobei jedes Fotoelektron mehrere Elektronen herausschlägt. Diese schlagen ihrerseits aus einer höher positiven zweiten Dynode wieder Sekundärelektronen heraus. Über acht bis zwölf Dynoden (Gesamtspannung 2000 bis 3000 V) wächst der Elektronenstrom lawinenartig an.

**Innerer lichtelektrischer Effekt.** Kristalle und Halbleiter mit eingelagerten Fremdatomen werden bei Lichtabsorption leitfähig bzw. eine bereits vorhandene Leitfähigkeit wird erhöht, so daß man sie als sogenannte *Widerstandszellen* oder *Fotoleiter* (Se-, Se-Te- oder Tl-Verbindungen sowie CdS, CdSe oder PbS; Ge und Si im Vakuum) verwenden kann.

Ge- und Si-Zellen haben darüber hinaus die Eigenschaft ,daß bei ihnen der lichtelektrische Effekt richtungsabhängig ist. Sie müßten genauer als Foto-Richtleiter bezeichnet werden. Üblich ist für sie die Bezeichnung *Fotodiode*.

Eine Weiterentwicklung der Fotodiode ist der *Fototransistor*. Bei ihm wird der durch den Lichteinfall erzeugte Fotostrom weiter verstärkt.

Mischleiter, wie Kupferoxydul-Kupfer, liefern bei Lichtabsorption eine genügend große EMK (bei 1000 Lux = 1000 Lumen/m² etwa 20 mV), die die Bezeichnung *Fotoelement* rechtfertigt. Im Halbleiter ($Cu_2O$) findet eine innere fotoelektrische Erregung statt, die es ermöglicht, daß freigewordene Elektronen die Grenzschicht durchdringen und in den Leiter (Cu) übertreten.

Bild 2*A* zeigt eine „Hinterwandzelle" (besonders für rotes Licht), bei der das Licht das $Cu_2O$ bis zur Sperrschicht durchdringen muß, Bild 2*B*

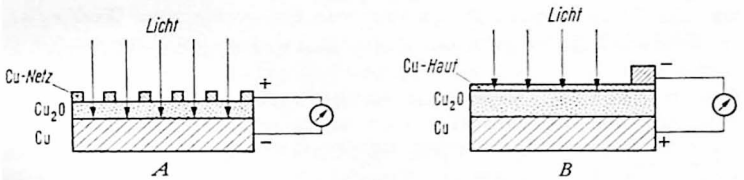



Bild 2 Sperrschichtzellen. *A* Hinterwandzelle, *B* Vorderwandzelle

eine „Vorderwandzelle" (für sichtbares Licht), bei der auf die $Cu_2O$-Schicht eine durchsichtige Cu-Haut aufgedampft ist, so daß die obere Sperrschicht wirksam ist (zur unteren Sperrschicht dringt das Licht nicht mehr durch). Sperrschichtzellen haben in großen Bereichen eine nahezu lineare Charakteristik.

Heute werden in zunehmendem Maße Si- und Se-Fotoelemente verwendet, an deren Wirkungsweise die Sperrschicht als „pn-Übergang" erklärt werden soll.

Beim Si beispielsweise sind zwei Arten der Leitfähigkeit möglich: P- oder As-Spuren bedingen n-leitendes (*n*egativ-leitendes, elektronenreiches) und Ga- oder B-Spuren p-leitendes (*p*ositiv-leitendes, elektronenarmes oder „löcherreiches") Si. An der Übergangsstelle von n- und p-leitendem Si verbinden sich freie Elektronen mit freien Löchern, so daß auf der einen Seite positiv geladene und auf der anderen Seite negativ geladene Atome der Spurenelemente zurückbleiben. Es entsteht ein elektrisches Feld, das als Sperrschicht für weitere freie Elektronen und Löcher wirkt.

Bei Lichtabsorption werden aber unter Einwirkung des elektrischen Feldes der Übergangsschicht die noch freien Elektronen zur n-leitenden Schicht und die noch freien Löcher zur p-leitenden Schicht verschoben, so daß eine Spannung auftritt und ein Strom durch einen äußeren Kreis fließen kann.

## Thermoelektrizität

**Seebeck-Effekt.** Zwei an einem Ende zusammengelötete oder miteinander verschweißte Drähte aus verschiedenen Metallen oder Metallegierungen, die bei einer Temperaturdifferenz zwischen den verbundenen Enden (bei Thermoelementen „Meßstelle") und den nicht verbundenen Enden („Vergleichsstelle") eine EMK abgeben, nennt man ein *Thermopaar*. Die Thermospannung hängt sowohl von der Größe und dem Vorzeichen der Temperaturdifferenz sowie von den absoluten Temperaturen der Meß- und der Vergleichsstelle ab, als auch von den verwendeten Werkstoffen (s. Tafel 12, S. 9 und Tafel 21).

**Tafel 21** Thermospannungen gebräuchlicher Thermopaare bei der Bezugstemperatur 0 °C

| Plusschenkel<br>Minusschenkel | Cu<br>Konst | Fe<br>Konst | NiCr<br>Ni | PtRh<br>Pt |
|---|---|---|---|---|
| Temperatur | Thermospannung | | | |
| °C | mV | mV | mV | mV |
| —100 | —3,40 | —4,75 | | |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 100 | 4,25 | 5,37 | 4,10 | 0,643 |
| 500 | 27,40 | 27,84 | 20,65 | 4,221 |
| 1000 | | | 41,31 | 9,570 |
| 1500 | | | | 15,530 |

**Peltier-Effekt.** Die Umkehr des thermoelektrischen Vorgangs ist der elektrothermische Vorgang. Ein in Richtung des Thermostromes durch ein Thermopaar fließender Strom bewirkt die Abkühlung der Verbindungsstelle. Da dieser Strom andererseits aber auch Wärme erzeugt und die Verbindungsstelle darüber hinaus durch Wärmeleitung erwärmt wird, sind an ein Thermopaar für die Kälteerzeugung folgende Forderungen zu stellen: zu erzielende Temperaturdifferenz maximal, spezifischer elektrischer Widerstand und spezifische Wärmeleitfähigkeit minimal. Besonders hohe Temperaturdifferenzen liefern Thermopaare aus Halbleitern, und zwar aus n- und p-leitendem $Bi_2Te_3$ und PbTe. Elementaufbau: warmer Kontaktkörper (z.B. Cu), n-leitender Halbleiter, kalter Kontaktkörper (z.B. Cu), p-leitender Halbleiter, warmer Kontaktkörper (z.B. Cu). Es handelt sich hierbei praktisch um die Kombination zweier Thermopaare mit einem gemeinsamen kalten Kontaktkörper ohne Stromzuführungen.

## Piezoelektrizität

**Piezoelektrischer Effekt.** Wirkt in Richtung der elektrischen oder neutralen Achse eines rechteckigen Quarzprismas (eine Ebene senkrecht zur elektrischen und eine senkrecht zur optischen Achse geschnitten) auf die Fläche $A$ eine Kraft $F$ (Druck oder Zug), so tritt an den senkrecht zur elektrischen Achse angebrachten Elektroden mit der Fläche $S$ eine elektrische Ladung $Q$ auf:

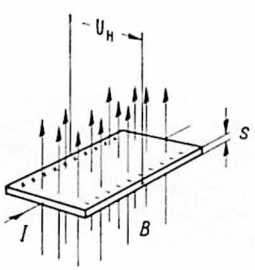
$$Q = k \frac{F}{A} S$$

($k$ Faktor). Diese Eigenschaft zeigt auch besonders gut Seignettesalz (weinsteinsaures Kalium), bei dem die Ladungen aber an den Belastungsflächen abgenommen werden. Während $k$ für Quarz klein ($2 \cdot 10^{-11}$ C/kp) und konstant ist, ist $k$ für Seignettesalz zwar groß, doch druckabhängig. Da zudem Quarz eine große Festigkeit hat und ausgezeichnet isoliert; Seignettesalz jedoch wenig fest und schwach hygroskopisch ist, wird in der Technik praktisch nur Quarz verwendet.

**Piezoelastischer Effekt, Elektrostriktion.** Die Umkehrung des piezoelektrischen Effekts erhält man, wenn man an die Elektroden eine Spannung legt: Quarz verkürzt oder dehnt sich je nach dem Vorzeichen der Ladung.

## Galvanomagnetische Effekte

**Hall-Effekt.** Wird ein rechteckiges Metallplättchen in der Längsrichtung von einem Strom durchflossen und senkrecht zu seiner Fläche von einem Magnetfeld durchsetzt, so tritt zwischen den Längsseiten eine Potentialdifferenz, genannt Hall-Spannung, auf (s. Bild 3). Die Elektronen werden




$I$ Strom
$B$ magnetische Induktion
$U_H$ Hall-Spannung
$s$ Dicke des Metallplättchens

Bild 3 Hall-Effekt

nämlich vom Magnetfeld sowohl senkrecht zu ihrer Bewegung (entgegen der eingezeichneten Stromrichtung) als auch senkrecht zum Magnetfeld abgelenkt, so daß die eine Längsseite des Leiters an Elektronen verarmt und sich an der anderen Elektronen anreichern. Die Änderung der Elektronendichte dauert so lange an, bis das entstehende elektrische Gegenfeld, das Hall-Feld, auf die Elektronen eine gleich große, aber entgegengesetzt gerichtete Kraft wie das Magnetfeld ausübt. Die Hall-Spannung $U_H$ ist dann dem Produkt aus dem Strom $I$ und der magnetischen Induktion $B$ proportional und der Dicke $s$ des Leiters umgekehrt proportional:

$$U_H = R_H \frac{I\,B}{s}\,.$$

$R_H$ ist ein Proportionalitätsfaktor, der die Eigenschaften des Leiters berücksichtigt und Hall-Konstante genannt wird. Er beträgt z. B. für In Sb etwa 240 $cm^3/As$ und für die entsprechende Arsenverbindung ungefähr 120 $cm^3/As$.

**Gauß-Effekt.** Der elektrische Widerstand in der Längsrichtung des Metallplättchens in Bild 3 ist von der Stärke des Magnetfeldes abhängig. Man spricht vom magnetfeldabhängigen hallseitigen Innenwiderstand oder auch vom magnetischen Widerstands-Effekt.

## Magnetostriktion

**Magnetostriktiver Effekt.** Bringt man einen ferromagnetischen Körper in ein homogenes Magnetfeld, dann richten sich die sogenannten Weißschen Bezirke (größere Bereiche von Elementarmagneten, etwa $10^{11}$ bis $10^{15}$ Atome bei einem maximalen Volumen von etwa $10^{-8}$ $cm^3$ umfassend) aus. Es treten Deformationen des Gitters auf, die von Bezirk zu Bezirk verschieden sein können und innere Spannungen verursachen. Die Spannungen bewirken Längen- und Volumenänderungen, z. B. bei Eisen Verlängerungen und bei Nickel Verkürzungen. Der Übergang von negativen zu positiven Werten, also Magnetostriktion gleich Null, entspricht vollständiger Spannungsfreiheit und damit Höchstwerten der Permeabilität. Ein Beispiel dafür ist PERMALLOY.

**Magnetoelastischer Effekt.** Mechanische Spannungen erzeugen Änderungen (Vorzugsrichtungen) der Magnetisierung.

# III. Grundbegriffe der Elektromeßtechnik

## Begriffserklärungen

(Weiteres s. VDE 0410 und DIN 1319)

*Anzeige:* Stand der Marke auf der Skale.

*Anzeigebereich:* Gesamter Skalenumfang.

*Anzeigefehler, Schreibfehler:* Fehlergrenzen in Prozent (s. Tafel 22).

*Bewegliches Organ:* Meßwerkteil, dessen Bewegung oder Lage vom Meßwert abhängt.

*Dämpfung:* Begrenzt im allgemeinen beim Einschalten eines $^2/_3$ Skalenlänge entsprechenden Meßwertes die erste Überschwingung des vom Skalenanfang einspielenden Zeigers auf 20% der Skalenlänge. Die Beruhigungszeit (Zeit, die vergeht, bis der Zeiger von endgültiger Einstellung nicht weiter als 1,5% der Skalenlänge entfernt ist) wird dabei im allgemeinen auf 4 s begrenzt.

*Eigenverbrauch* (z.B. in mVA):

Strommesser: Spannungsabfall (in mV) × Nennstrom (in A);

Spannungsmesser: Stromaufnahme (in mA) × Nennspannung (in V).

Den Eigenverbrauch von Spannungsmessern kann man durch den für Vollausschlag erforderlichen Strom $I$ kennzeichnen. Aus praktischen Gründen gibt man aber den Kehrwert $1/I$ an, und zwar gewohnheitsgemäß in Ω/V. Je größer dieser Wert, desto geringer der Eigenverbrauch $P_e$, der sich im Meßbereich $U_n$ aus der gemessenen Spannung $U$ errechnet zu

$$P_e = \frac{U^2}{R} = \frac{U^2}{U_n \cdot (1/I)}.$$

*Empfindlichkeit:* Verhältnis der Anzeigeänderung (nicht einer Änderung des Ausschlagwinkels!) zur Meßgrößenänderung.

Dimension $\frac{\text{Länge}}{\text{Meßgröße}}$, also Einheit z.B. $\frac{\text{mm}}{\text{A}}$.

Große Empfindlichkeit entspricht in der Regel kleinem Eigenverbrauch.

*Fehlangabe, Fehler:* Differenz zwischen angezeigtem und wahrem Wert der Meßgröße, angegeben in Einheiten der Meßgröße oder in Skalenteilen.

*Garantiefehlergrenzen, Klasse:* Garantierte Grenzen, in denen die Fehler der ermittelten Meßwerte liegen, wenn festgelegte Bedingungen, das sind die Einflußbereiche entsprechend VDE 0410, eingehalten werden.

*Klassenzeichen* (s. Tafel 26, S. 32): Kennzeichnung von Meßgeräten, die den „Regeln für elektrische Meßgeräte", VDE 0410, entsprechen.

*Mechanischer Nullpunkt:* Punkt, auf den sich der Zeiger nach Abschalten des Meßgerätes einstellen will.

*Meßbereich:* Teil der Skale, für den die Genauigkeitsbestimmungen eingehalten werden; durch Punkte an Skalenstrichen gekennzeichnet, wenn sie nicht für den gesamten Skalenumfang gelten.

*Meßbereichauswahl:* Der durch die Klassenangabe mit ausgedrückte zulässige Anzeigefehler in % bezieht sich im allgemeinen auf Meßbereichendwerte (s. Tafel 22). Bei einem Spannungsmesser für z. B. 100 V, Klasse 1,5 ist also bei 100 V ein Anzeigefehler von $\pm 1{,}5\,\% = \pm 1{,}5$ V zulässig. Vom Meßwert 50 V würden die $\pm 1{,}5$ V jedoch schon $\pm 3\,\%$ ausmachen und vom Meßwert 10 V sogar $\pm 15\,\%$. Man muß deshalb ein Instrument stets so wählen, daß sein Meßbereich bei den zu erwartenden Meßwerten möglichst weit ausgenutzt wird.

*Meßgerät:* Meßinstrument mit sämtlichem Zubehör, auch dem trennbaren.

*Meßgröße:* Zu messende Größe.

*Meßinstrument:* Meßwerk (ggf. mehrere) mit Gehäuse und eingebautem Zubehör.

*Meßwerk:* Bewegliches Organ einschließlich der Teile, die mit Voraussetzung für seine Bewegung sind, sowie der Skale.

*Meßwert:* Gemessener Wert der Meßgröße.

*Nennlage:* Durch Lagezeichen (s. Tafel 26, S. 32) angegebene Lage der Skalenfläche oder Skalenebene (d. i. bei kegelförmigen Skalen die senkrecht zur Kegelachse liegende Ebene) zur Horizontalen, in der ein Meßinstrument seiner Klasse entspricht.

*Skalenanfangswert:* Wert des ersten Striches der Teilung.

*Skalenendwert:* Wert des letzten Striches der Teilung.

*Skalenlänge, Schreibbreite:* (Bogen-)Länge des Anzeigebereiches in mm, gemessen über die Mitte der kleinen Teilstriche.

*Skalennullpunkt:* Mit Null bezifferter Strich der Skale (kann verschieden vom mechanischen Nullpunkt sein). Unterdrückter Skalennullpunkt erscheint nicht auf der Skale.



*Skalenteil:* Abstand zweier benachbarter Teilstriche.

## Klasseneinteilung und Fehlergrenzen elektrischer Meßgeräte nach VDE 0410/10.59

**Tafel 22** Zulässige Anzeige- und Schreibfehler elektrischer Meßgeräte sowie zulässiger Einfluß

| Geräteart | Klasse | Zuläss. Fehler [1]) sowie zuläss. Einfluß [2]) jeweils in ± % | Zulässiger Fehler sowie zulässiger Einfluß in % bezogen auf | bei Meßgeräten |
|---|---|---|---|---|
| Feinmeßgeräte | 0,1<br>0,2<br>0,5 | 0,1<br>0,2<br>0,5 | Meßbereichendwert | mit mechanischem Nullpunkt und bei Zeigerfrequenzmessern |
| | | | Summe der Endwerte | mit Nullpunkt innerhalb der Skale |
| Betriebsmeßgeräte | 1<br>1,5<br>2,5<br>5 | 1<br>1,5<br>2,5<br>5 | Skalenlänge (Schreibbreite) | ohne mechanischen Nullpunkt und mit stark nichtlinearer Skale (z. B. bei Widerstandsmessern) |
| | | | richtigen Wert | Zungenfrequenzmessern |

[1]) Für das Instrument einschließlich der als zugehörig gekennzeichneten Neben- und Vorwiderstände.
[2]) Bei Änderung *einer* Einflußgröße, wie z. B. Lage oder Temperatur.

Genauigkeitsprüfungen bei Geräten, die Klassenzeichen erhalten sollen, werden als Stück- oder als Typenprüfungen durchgeführt.
Stückprüfungen: Anzeige- und Schreibfehler sowie Lageeinfluß.
Typenprüfungen: Lageeinfluß, Dämpfung und Beruhigungszeit, Temperatur-, Spannungs-, Strom-, Anwärm-, Frequenz-, Leistungsfaktor-, Fremdfeld-, Unsymmetrie-, Kopplungs-, Einbau- und ggf. Schütteleinfluß.

**Tafel 23** Zulässige Fehler austauschbarer, getrennt gelieferter Neben- und Vorwiderstände

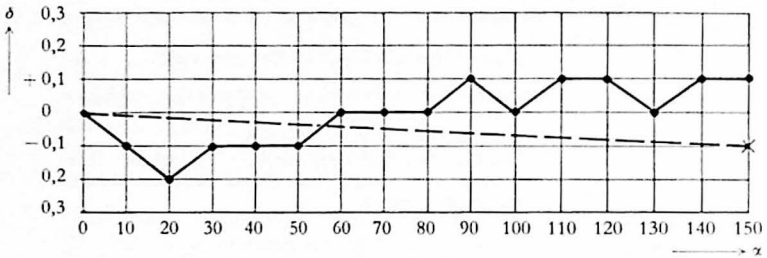
| Klasse des Widerstandes | 0,05 | 0,1 | 0,2 | 0,5 | Zulässige Fehler gelten: |
|---|---|---|---|---|---|
| Zulässiger Fehler in ± % des Nennwertes | 0,05 | 0,1 | 0,2 | 0,5 | für Temperaturen 10 bis 30 °C, bei beliebiger bis Nennbelastung und bei Nebenwiderständen Klasse 0,5 nach 1 h Vorbelastung mit 80 % $I_n$ |
| für Meßgeräte der Klasse | 0,1 | 0,2 | 0,5 | 1 | |

## Korrektionen bei Feinmessungen

Wenn besonderer Wert darauf gelegt wird, kann die Genauigkeit bei Feinmessungen über die durch die Klasse des Instrumentes gegebenen Grenzen hinaus an Hand der dem Instrument beigefügten Korrektionstabelle erhöht werden. In dieser sind die Korrektionswerte für jeden zehnten Teilstrich angegeben (Zwischenwerte interpolieren!).

Der jeweilige Korrektionswert ist vorzeichenrichtig zu dem abgelesenen Wert zu addieren. — Beim Einstellen des Instrumentes auf einen geforderten Meßwert ist er dagegen mit umgekehrtem Vorzeichen anzuwenden.

Bei umschaltbaren Instrumenten enthalten die Korrektionstabellen auch noch Korrektionen für die Endwerte der weiteren Bereiche, deren Zwischenwerte sich dadurch aus den Korrektionswerten des Grundmeßbereiches leicht und hinreichend genau grafisch ermitteln lassen. Die Korrektionswerte werden zu diesem Zweck gemäß Bild 4 aufgetragen und die Abszissenachse des erweiterten Bereiches eingezeichnet. Ihr Endpunkt ergibt sich, indem vom Ordinatenabschnitt $\delta_{c1}$ (Korrektion bei Endausschlag im Grundbereich) $\delta_{c2}$ (entsprechende Korrektion im erweiterten Bereich) subtrahiert wird. Von der neuen Abszissenachse aus lassen sich dann alle Zwischenkorrektionen für den erweiterten Bereich ablesen.




——— Verlauf der Korrektionswerte für den Grundmeßbereich mit $\delta_{e1} = +0{,}1$;
– – – – Abszissenachse eines erweiterten Meßbereiches mit $\delta_{e2} = +0{,}2$;
$\delta_{e1} - \delta_{e2} = -0{,}1$. Für z. B. $\alpha = 110$ liest man einen Korrektionswert von etwa + 0,17 ab

Bild 4 Grafische Ermittlung von Korrektionen an den Zwischenwerten der erweiterten Meßbereiche

Der Nullpunkt des Instrumentes ist nach VDE 0410 einzustellen und darf später nicht nachgestellt werden, da etwaige Nullpunktänderungen bereits in der Korrektionstabelle berücksichtigt sind.

**Tafel 24** Prüfspannungen lt. VDE 0410/10.59

| Nennspannung[1] $U_n$ | Prüfspannung $U_p$ | Prüfspannungszeichen (s. Tafel 26) |
|---|---|---|
| V | V | |
| bis 40 | 500 | Stern ohne Zahl |
| über 40 bis 650 | 2000 | Stern mit Zahl 2 |
| über 650 bis 1000 | 3000 | Stern mit Zahl 3 |
| über 1000 bis 1500 | 5000 | Stern mit Zahl 5 |
| über 1500 bis 3000 | 10000 | Stern mit Zahl 10 |
| über 3000 bis 6000 | 20000 | Stern mit Zahl 20 |
| über 6000 bis 10000 | 30000 | Stern mit Zahl 30 |
| über 10000 bis 15000 | 50000 | Stern mit Zahl 50 |
| über 15000 | $2{,}2\,U_n + 20000$ | Stern mit $U_p$ in kV |
| Instrumente für Wandleranschluß[2] | 2000 | Stern mit Zahl 2 |
| keine Spannungsprüfung | | Stern mit Zahl 0 |

[1]) $U_n$ des Stromkreises, in dem das Instrument verwendet werden kann; bei Spannungsmessern normalerweise Meßbereich-Endwert.
[2]) Prüfspannungen für Wandler s. Tafel 62, S. 183.

**Tafel 25** Meßbereich-Endwerte nach DIN 43701

| Drehspul- und Drehmagnet-Instrumente | Dreheisen-Instrumente: Direkter Anschluß | Dreheisen-Instrumente: Wandleranschluß |
|---|---|---|
| 1 10 100 | 1 10 100 | 1 10 100 |
| | | 1,2 12 120 |
| 1,5 15 150 | 1,5 15 150 | 1,5 15 150 |
| | | 2 20 200 |
| 2,5 25 250 | 2,5 25 250 | 2,5 25 250 |
| | | 3 30 300 |
| 4 40 400 | 4 40 400 | 4 40 400 |
| | | 5 50 500 |
| 6 60 600 | 6 60 600 | 6 60 600 |
| | | 8 80 800 |
| µA mA A kV<br>mV V kV | mA A kA<br>V kV<br>außerdem üblich 500 V | A kA<br>V kV<br>außerdem üblich 75 A |

Liegt Nullpunkt in Skalenmitte, so müssen beide Meßbereich-Endwerte Werte der Normreihe sein, liegt er an anderer Stelle innerhalb der Skale, so muß Summe der Meßbereich-Endwerte Wert der Normreihe sein. — Bei Mehrfach-Skalen muß jede Einzel-Skale der Normreihe entsprechen. — Ist eine Skalenteilung für mehrere Meßbereiche beziffert, so muß eine Bezifferung der Normreihe entsprechen und die Bereiche müssen zueinander im Verhältnis 1:2, 1:5 oder 1:10 stehen.

**Tafel 26** Sinnbilder für Meßinstrumentaufschriften

| | | | |
|---|---|---|---|
| — | für Gleichstrom | | Drehspulmeßwerk |
| ≂ | für Gleich- und Wechselstrom | | als Zusatz zu Gleichrichter |
| ~ | für Wechselstrom [1]) | | Thermoumformer |
| ≋ | für Drehstrom mit einem Meßwerk | | isol. Thermoumformer |
| ≋ | für Drehstrom mit zwei Meßwerken | | Drehspul-Quotientenmeßwerk |
| ≋ | für Drehstrom mit drei Meßwerken | | Drehmagnetmeßwerk |
| 1,5 | Klassenzeichen, bezogen auf Meßbereich-Endwert | | Drehmagnet-Quotientenmeßwerk |
| 1,5 | Klassenzeichen, bezogen auf Skalenlänge bzw. Schreibbreite | | Dreheisenmeßwerk |
| (1,5) | Klassenzeichen, bezogen auf richtigen Wert | | Dreheisen-Quotientenmeßwerk |
| ⊥ | Senkrechte Nennlage | | Elektrodynamisches Meßwerk (eisenlos) |
| ⊓ | Waagerechte Nennlage | | Elektrodynamisches Quotientenmeßwerk (eisenlos) |
| ∠60° | Schräge Nennlage (mit Neigungswinkelangabe) | | Elektrodynamisches Meßwerk (eisengeschlossen) |
| ☆ | Prüfspannung, Inschrift s. Tafel 24 | | Elektrodynamisches Quotientenmeßwerk (eisengeschlossen) |
| | Hinweis auf getrennten Nebenwiderstand | | Induktionsmeßwerk |
| | Hinweis auf getrennten Vorwiderstand | | Induktions-Quotientenmeßwerk |
| ○ | Magnetischer Schirm (Eisenschirm) | | Hitzdrahtmeßwerk |
| ◌ | Elektrostatischer Schirm | | Bimetallmeßwerk |
| ast | Astatisches Meßwerk | | Elektrostatisches Meßwerk |
| ⚠ | Achtung (Gebrauchsanleitung beachten)! | | Vibrationsmeßwerk |
| ϟ | Instrument entspricht bezüglich Prüfspannung nicht den Regeln | (Sch) e | Schlagwettergesch. Ausführung Schutzart „Erhöhte Sicherheit" |
| — | Spannbandlagerung (Strich unter Sinnbilder; Siemens-Hausnorm) | (Ex) e G1 | Explosionsgesch. Ausführung Schutzart „Erh. Sicherh." Zündgr. G 1 |

Beispiel: ≋ 50 (1,5) ⊥ ☆ 50/5A 1000/100V — Instrum. f. Drehstrom 50 Hz mit zwei eisengeschloss. el.-dyn. Meßwerken Kl. 1,5; senkr. Nennlage; Prüfspannung 2 kV; Wandleranschluß: prim. Nennstr. 50 A, sek. Nennstr. 5 A, prim. Nennsp. 1000 V, sek. Nennsp. 100 V

[1]) Ist keine Frequenz angegeben, so gilt 45 bis 65 Hz als Nennfrequenzbereich.

**Tafel 27** Darstellungen von elektrischen Meßinstrumenten und Meßgeräten in Schaltzeichnungen

| | | | |
|---|---|---|---|
| | Meßinstrument, allgemeine Darstellung, insbesondere anzeigend | | Leistungsmesser f. Vierleiter-Drehstrom belieb. Belast. mit drei Meßwerken (Strompfade in Reihe), Anzeige in W [1]) |
| | Anzeigendes Meßinstrument mit einem Meßwerk zur Produktbildung [1]) | | Meßgerät, allgemeine Darstellung, insbesondere registrierend |
| | Anzeigendes Meßinstrument mit einem Meßwerk zur Quotientbildung [1]) | | Meßgerät, Darstellung der Registrierung: schreibend |
| | Meßinstrument, Darstellung der Anzeige allgemein | | Meßgerät, Darstellung der Registrierung: punktschreibend |
| | Meßinstrument, Darstellung der Anzeige mit beiderseitigem Ausschlag | | Meßgerät, Darstellung der Registrierung: digital druckend |
| | Meßinstrument, Darstellung der digitalen Anzeige | | Meßgerät, Darstellung der Registrierung: lochend |
| | Strommesser, Anzeige in A | | Leistungsschreiber f. Dreileiter-Drehstrom belieb. Belast. mit zwei Meßwerken (Strompfade in Reihe), Anzeige in W [1]) |
| | Strommesser mit einem Meßwerk, Anzeige in A [1]) | | Widerstandsmeßbrücke mit eingebautem Nullinstrument |
| | Spannungsmesser für Gleich- u. Wechselspannung, Anzeige in V | | Integrierendes Meßgerät, insbesondere Elektrizitätszähler |
| | Spannungsdifferenz-Messer mit einem Meßwerk [1]) | | kWh-Zähler f. Dreileiter-Drehstrom belieb. Belast. mit zwei Meßwerken [1]) |

[1]) Nur wenn Unterscheidung erforderlich, wird der Spannungspfad in einfacher Strichstärke und der Strompfad in etwa doppelter Strichstärke dargestellt.

**Tafel 28** In der Elektromeßtechnik ausgenutzte elektrische Wirkungen

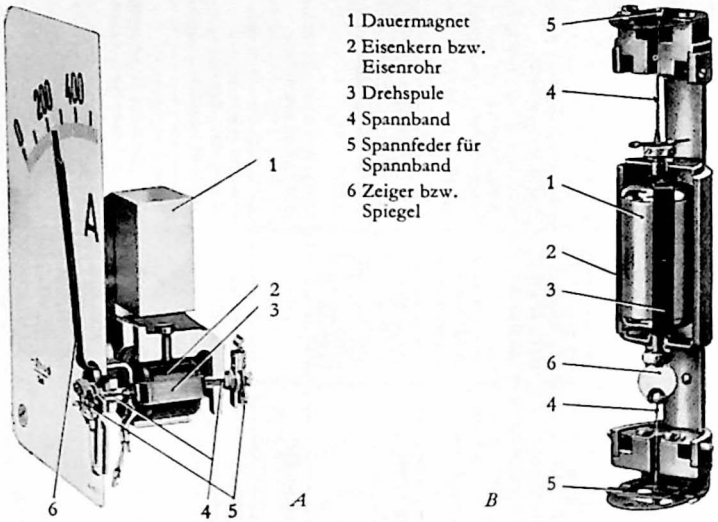
| Anzeige durch | Ausgenutzte elektrische Wirkung | | Richtmoment | Ausgenutzt für |
|---|---|---|---|---|
| unmittelbare Drehmomentbildung | Ablenkung eines stromdurchflossenen Leiters | im homogenen Dauermagnetfeld | mechanisch: Spiralfeder, Torsion eines Spannbandes oder einer Drahtschleife | Drehspulmeßwerk (für Strom- und Spannungsmessung bei Gleichstrom) Galvanometer Spulenschwinger Schleifenschwinger |
| | | im homogenen Elektromagnetfeld | | Elektrodynamisches Meßwerk (z. B. für Leistungsmessung) Leistungsschwinger |
| | | | (magnetisch; Bremsmoment) | Zähler |
| | Einstellung zweier gekreuzter oder paralleler stromdurchflossener Leiter | im inhomogenen Dauermagnetfeld | (elektrisch; Drehmomentwaage) | Drehspul-Quotientenmeßwerk (z. B. für Widerstandsthermometer) |
| | | im inhomogenen Elektromagnetfeld | | Elektrodynamisches Quotientenmeßwerk (z. B. für Leistungsfaktor- und Frequenzmessung) |
| | Abstoßung zweier gleichpolig magnetisierter Eisenkörper | | mechanisch (wie oben) | Dreheisenmeßwerk (für Strom- und Spannungsmessung bei Gleich- und Wechselstrom) |
| | Einstellung eines ringförmigen Weicheisenkörpers unter dem Einfluß zweier Elektromagnetfelder | | (elektrisch; Drehmomentwaage) | Dreheisen-Quotientenmeßwerk (z. B. für Fernanzeige meßwertproportionaler Widerstände mit Wechselstrom) |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Einstellung eines Magnets auf die Resultierende | aus einem Dauer- und einem Elektromagnetfeld | magnetisch | Drehmagnetmeßwerk (für Strom- und Spannungsmessung bei Gleichstrom) |
| | | aus zwei Elektromagnetfeldern | (elektrisch; Drehmomentwaage) | Drehmagnet-Quotientenmeßwerk (z. B. für Isolationsmesser) |
| | Mitnahme eines infolge Induktion Wirbelströme führenden Leiters in einem elektromagnetischen Dreh- oder Wanderfeld | | mechanisch: Spiralfeder | Induktionsmeßwerk (für Zeigerinstrumente, heute nur wenig gebaut) |
| | | | (magnetisch; Bremsmoment) | Zähler |
| | Anziehung und Abstoßung zweier elektrischer Ladungsträger | | mechanisch: Spiralfeder oder Torsion eines Spannbandes | Elektrostatisches Meßwerk (für fast leistungslose Gleich- und Wechselspannungsmessung) |
| Fluoreszenz | Ablenkung eines Elektronenstrahls im elektrostatischen Feld | | — | Elektronenstrahlröhre |
| mittelbare Drehmomentbildung | Wärmewirkung | erfaßt durch Längenänderung eines Drahtleiters | mechanisch: Blattfeder | Hitzdrahtmeßwerk (für Strom-, Spannung und Leistung, nur noch vereinzelt angewandt) |
| | | erfaßt durch Formänderung eines Bimetallstreifens | mechanisch: Elastizität des Bimetallstreifens | Bimetallmeßwerk (z. B. für träge Strommesser zur Anzeige länger dauernder Überlastungen) |
| Ausschlag von Zungenenden | Resonanz frequenzabgestimmter zungenförmiger Magnetanker durch Wechselstrommagnetisierung | | mechanisch: Elastizität der Magnetanker | Vibrationsmeßwerk |

# IV. Technik der elektrischen Meßinstrumente

## Meßwerke

### Drehspulmeßwerk




*A* Außenmagnet-Bauweise am Beispiel eines Betriebsinstruments
*B* Kernmagnet-Bauweise am Beispiel eines Feinmeßinstruments

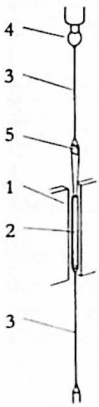
Bild 5 Drehspulmeßwerk mit Spannbandlagerung

*Wirkungsweise:* Je nach dem Sitz der magnetischen Energie befindet sich die Spule 3 im homogenen Feld zwischen dem Außenmagnet 1 und dem Eisenkern 2 (Bild 5 *A*) oder in dem zwischen dem Kernmagnet 1 und dem Eisenrohr 2 (Bild 5 *B*). Fließt über die Spannbänder 4 (oder über die Richtkraftfedern bei Spitzenlagerung) ein Strom durch die Wicklung, dann wird auf die Spule ein Drehmoment ausgeübt und sie dreht sich so weit, bis das von den Spannbändern (oder den Richtkraftfedern) erzeugte Rückstellmoment Gleichgewicht hält.

*Eigenart:* Das Drehspulmeßwerk eignet sich nur für Gleichstrom- und Gleichspannungsmessungen. Sein Eigenverbrauch ist gering und seine

Skale völlig linear. Die Zeigerausschlagsrichtung hängt von der Stromrichtung ab, so daß Nullpunkt innerhalb der Skale möglich. Gedämpft wird durch ein Kurzschlußrähmchen (Spulenträger) und durch die Spulenwicklung selbst. Deshalb ist bei niedrigen Meßbereichen der äußere Schließungswiderstand zu berücksichtigen. Störungen durch Fremdfelder werden vom eigenen Magnetfeld weitgehend unterdrückt.

## Spulenschwinger-Meßwerk




1 Magnetpolschuh (außerhalb des Schwingergehäuses)
2 Drehspule
3 Spannband
4 Spannfeder für Spannband
5 Spiegel

Bild 6
Spulenschwinger-Meßwerk

*Wirkungsweise:* Die äußerst feine freitragende Spule 2, deren Gewicht nur einige mp beträgt, ist im Feld zwischen den Magnetpolschuhen 1 (Bild 6) angeordnet, ohne daß das Feld wie beim Drehspulmeßwerk mit Außenmagnet mittels eines Eisenkernes homogenisiert wird. Die Wirkungsweise entspricht aber doch prinzipiell der eines Drehspulmeßwerks.

*Eigenart:* Spulenschwinger werden in den Lichtstrahl-Oszillographen in erster Linie für das Aufzeichnen von in Stromschwankungen umgeformten mechanischen Schwingungen benutzt, weil ihre untere Frequenzgrenze ebenso wie ihre erreichbare höchste Eigenfrequenz verhältnismäßig niedrig liegt. Sie sind bei Eigenfrequenzen $< 500$ Hz elektrodynamisch gedämpft und bei höheren Eigenfrequenzen flüssigkeitsgedämpft. Gegenüber den Schleifenschwingern haben sie einen größeren Galvanometer-Widerstand und eine wesentlich größere Stromempfindlichkeit (vgl. Tafeln 40 und 41, S. 85). Fremdfelder haben keinen Einfluß. (Schwinger s. S. 82 ff.)

## Schleifenschwinger-Meßwerk

*Wirkungsweise:* Der Stromweg besteht aus nur einer Windung in Form einer wie zwei Saiten gespannten Schleife 3 (Bild 7) und bildet gleichzeitig seine eigene reibungsfreie elastische Aufhängung. Zwei stegartige Auflagen begrenzen die freie Saitenlänge zwischen den Magnetpolschuhen 1. Fließt ein Strom durch die Schleife, so treten elektrodynamische Ablenkkräfte

auf, die die eine Saite nach vorn und die andere nach hinten zu bewegen suchen. Der Spiegel 4 als mechanische Kopplung dreht sich dadurch um die Symmetrieachse des beweglichen Organs bis das Rückstellmoment, gebildet von der Elastizität der Saiten, Gleichgewicht hält.

1 Dauermagnet
2 Magnetischer Rückschluß
3 Schleife
4 Spiegel

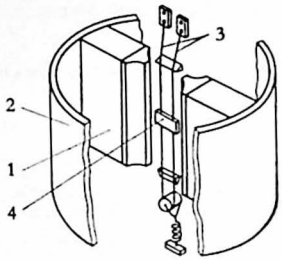



Bild 7
Schleifenschwinger-Meßwerk

*Eigenart:* Da beim Schleifenschwinger die Masse des beweglichen Organs kleiner als bei jedem anderen mechanischen Meßwerk ist, liegt seine erreichbare höchste Eigenfrequenz auch über der von allen anderen Schwingern. Er wird folglich in den Lichtstrahl-Oszillographen vorzugsweise zur Aufzeichnung höher frequenter Schwingungen verwendet. Schleifenschwinger sind stets flüssigkeitsgedämpft, weil die elektrodynamische Dämpfung (nur eine Windung!) kaum merklich ist. Der Galvanometer-Widerstand des Schwingers ist minimal, Stromempfindlichkeit s. Tafel 41, S. 85. Kein Fremdfeldeinfluß. (Schwinger s. S. 82ff.)

## Drehspul-Quotientenmeßwerk

In der bekanntesten Bauweise hat das bewegliche Organ zwei Spulen, deren Stirnseiten wie die Arme eines Andreaskreuzes zueinander liegen. Die Form der Polschuhe läßt den Luftspalt nach den Enden zu weiter, die Induktion daher geringer und das Drehmoment jeder Spulen von ihrer Lage abhängig werden.

Häufig wird auch die Kernmagnet-Bauweise angewandt, bei der das magnetische Feld im Luftspalt

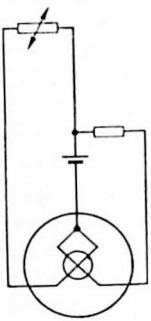


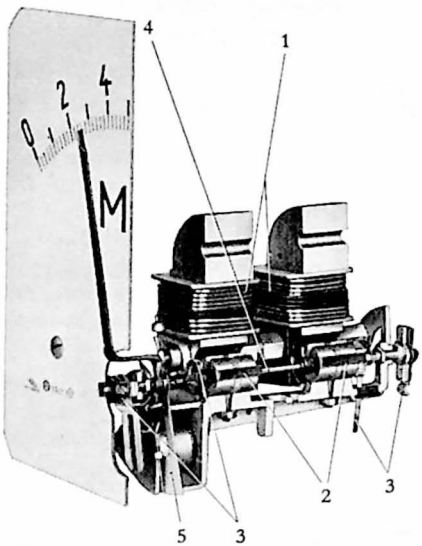
Bild 8 Kreuzspulinstrument zur Widerstandsmessung

zwischen dem Kern und dem als magnetischen Rückschluß dienenden Eisenrohr in erwünschter Weise sinusförmig verläuft.

Bei einer Schaltung nach Bild 8 werden die Drehmomente gegeneinander ausgewogen. Da die Batteriespannung an beiden beteiligt ist, wirkt sich ihre etwaige Veränderung nicht aus.

## Elektrodynamisches Meßwerk

*Wirkungsweise:* Im Feld der feststehenden, meistens im „Strompfad" liegenden Spule 1 ist die meistens als „Spannungspfad" geschaltete Spule 2 drehbar gelagert (Bild 9). Das aus der Feldstärke und dem Drehspulstrom

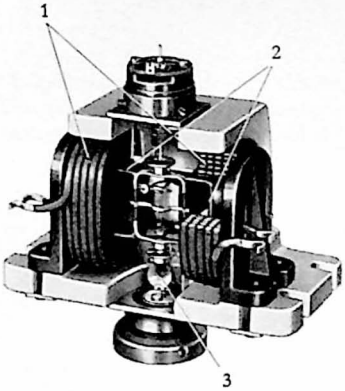



1 Feldspulen (Strompfad)
2 Drehspulen (Spannungspfad)
3 Stromzuführungen zu den Drehspulen (jeweils über Spannband und Richtkraftfeder)
4 Mittelachse
5 Wirbelstromdämpfung

Bild 9
Zweisystemiges eisengeschlossenes elektrodynamisches Leistungsmeßwerk für Betriebsinstrumente

resultierende Drehmoment stellt bei Gleichstrom das Produkt $P = U\,I$ dar. Es wird gegen das Drehmoment der Spannbänder und Richtkraftfedern ausgewogen, die auch den Strom zu den drehbaren Spulen führen (3). Die Ausschlagsrichtung bleibt die gleiche, wenn sich die Stromrichtung in beiden Pfaden gleichzeitig ändert. Daher ist das Meßwerk auch für Wechselstrom geeignet und spricht auf $U\,I\cos\varphi$ (Wirkleistung) an.

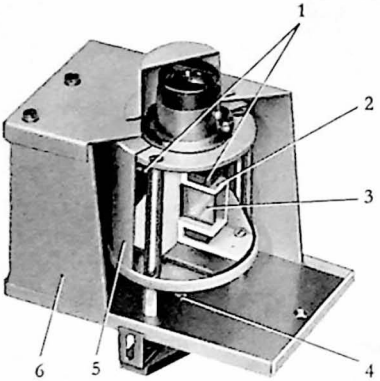
*Eigenart:* Elektrodynamische Meßwerke sind in den üblichen Bereichen weitgehend frequenz- und kurvenform-unabhängig. Eisenlos (magnetischer Fluß verläuft in Luft; s. Bilder 10 und 11) verwendet man sie für Feinmeßinstrumente und eisengeschlossen, zum Erzielen eines großen Drehmomentes, für Betriebsinstrumente und Schreiber.




1 Feldspulen (Strompfad)
2 Drehspulen (Spannungspfad)
3 Spiegel

Bild 10
Astatisches Präzisions-Leistungsmeßwerk

Zum Schutz gegen Fremdfelder werden bei den eisenlosen Meßwerken zwei Mittel angewandt: die Astasierung oder die Abschirmung.
Zur Astasierung (Bild 10) sind die aktiven Teile doppelt vorhanden; die beweglichen sitzen so auf der gemeinsamen Achse oder an gemeinsamen




1 Feldspulen (Strompfad)
2 Rechter Feldspulenhalter, zugleich rechte Dämpferkammer (Keramik)
3 Rechte Drehspule (zwischen Glasplättchen eingekittet; Spannungspfadhälfte)
4 Spiegel
5 Innenschirm
6 Außenschirm

Bild 11
Symmetrisch aufgebautes, doppelt abgeschirmtes Präzisions-Leistungsmeßwerk (Präzisions-Milliwattmeter)

Spannbändern, daß sich die von fremden Magnetfeldern hervorgerufenen Drehmomente gegenseitig aufheben.
Abgeschirmt wird mit hochpermeablen Blechen. Bild 11 zeigt ein doppelt abgeschirmtes Präzisions-Leistungsmeßwerk mit Lichtzeiger. Der Meßwerkspiegel sitzt zwischen dem Innen- und dem Außenschirm. Während der Außenschirm eine Austrittsöffnung für den Lichtzeiger hat, ist der Innenschirm nur zur Durchführung der Spannbänder durchbrochen.

### Elektrodynamisches Schleifenschwinger-Meßwerk

Bei diesem Schleifenschwinger-Meßwerk ist gegenüber dem in Bild 7, S. 38, der Dauermagnet durch einen Elektromagnet ersetzt. Der Schwinger dient zur Wiedergabe von Augenblickswerten des Produkts zweier Ströme, insbesondere zur Leistungsmessung. (Schwinger s. S. 82ff.)

### Dreheisenmeßwerk

*Wirkungsweise:* Das drehbar gelagerte Eisen 3 (Bild 12) und das feststehende 2 werden von der übergeschobenen Spule 1 gleichpolig magnetisiert und erzeugen durch ihre gegenseitige Abstoßung ein Drehmoment. Diesem wirkt das Drehmoment der Richtkraftfeder 4 entgegen. Die Eisen

1 Strom- oder Spannungsspule
2 Festes Eisen
3 Drehbar gelagertes Eisen
4 Richtkraftfeder
5 Luftdämpfung

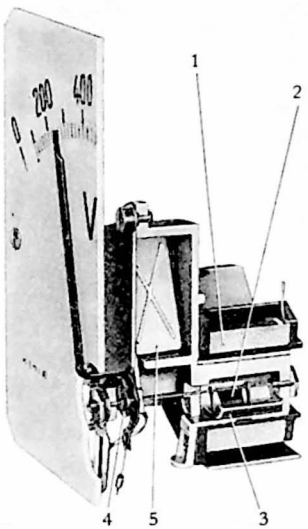
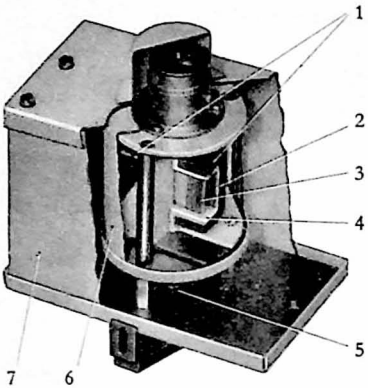



Bild 12
Dreheisenmeßwerk mit Spitzenlagerung für Betriebsinstrumente

oder auch die Spule sind so geformt, daß sich eine nahezu lineare Skalenteilung ergibt, obwohl die Beziehung zwischen Strom und gegenseitiger Abstoßung magnetisierter Eisen an und für sich quadratisch ist.

*Eigenart:* Das Dreheisenmeßwerk spricht auf den Effektivwert an und ist daher für Gleich- und Wechselstrommessungen brauchbar. Es hat keine Stromzufuhr zum beweglichen Organ; mechanisch und elektrisch ist es besonders robust.




1 Feldspulen
2 Feststehendes Eisen
3 Bewegliches Eisen (auf Dämpferflügel aufgesetzt)
4 Feldspulenhalter, zugleich Dämpferkammer
5 Spiegel
6 Innenschirm
7 Außenschirm

Bild 13
Symmetrisch aufgebautes, doppelt abgeschirmtes Präzisions-Dreheisenmeßwerk

Meßwerke für Feinmeßinstrumente werden gegen Fremdfelder abgeschirmt. Bild 13 zeigt ein doppelt abgeschirmtes Präzisions-Dreheisenmeßwerk mit Lichtzeiger (vgl. S. 41, oben).

## Drehmagnetmeßwerk

*Wirkungsweise:* Der drehbar gelagerte, über einen Durchmesser magnetisierte scheibenförmige Drehmagnet 2 (Bild 14) stellt sich in die Resultierende aus dem Feld der stromdurchflossenen feststehenden Spule 1 und dem des Richtmagnets 5 ein.

*Eigenart:* Das Drehmagnetmeßwerk eignet sich nur für Messungen bei Gleichstrom. Seine Skale ist nahezu proportional, läßt sich aber für besondere Zwecke in Grenzen dehnen oder zusammendrücken. Die Zeigerausschlagsrichtung hängt von der Stromrichtung ab, so daß der Nullpunkt innerhalb der Skale liegen kann. Das bewegliche Organ bedarf keiner Stromzuführungen sowie Richtmomentfedern und ist daher besonders leicht und erschütterungsfest.

1 Feldspule
2 Scheibenförmiger Drehmagnet
3 Luftdämpfung
4 Fremdfeld-abschirmung
5 Scheibenförmiger Richtmagnet
6 Magnetischer Nebenschluß

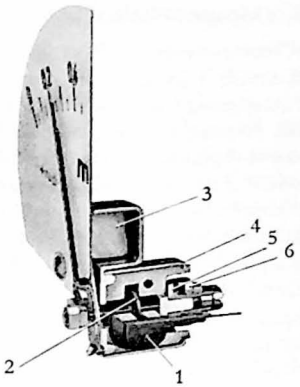



Bild 14
Drehmagnetmeßwerk für Betriebsinstrumente

## Elektrostatisches Meßwerk

*Wirkungsweise:* Die von zwei elektrischen Ladungen aufeinander ausgeübte Kraft nutzt man zum Messen von Spannungen aus, indem man den einen Ladungsträger feststehend und den anderen gegen eine Richtkraft (z.B. Spannband) beweglich anordnet. Der feststehende aktive Teil hat meistens die Form mehrerer übereinander oder als Quadrantenpaare angeordneter Kammern. Das bewegliche Organ besteht aus mehreren in die Kammern einschwenkenden Körpern („Nadeln") aus leichtem Blech oder beim Quadrantenelektrometer (Bild 15) aus einem solchen mit lemniskatenförmiger Umrißlinie.

*Eigenart:* Mit dem elektrostatischen Meßwerk können höchste Gleich- und Wechselspannungen sowie HF-Spannungen (Effektivwert) gemessen werden. Bei Gleichspannungsmessungen wird der Stromquelle nur die zur Aufladung erforderliche Elektrizitätsmenge entzogen, bei Wechselspannungsmessungen nur Blindleistung. Höchstwertige Isolation der Elektroden ist Voraussetzung.

1 Quadrantenkammer, z.T. geöffnet
2 Nadel
3 Spiegel

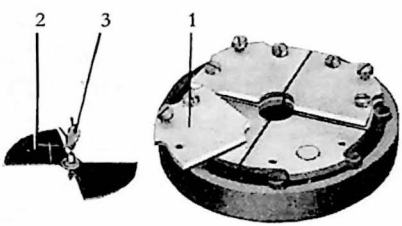
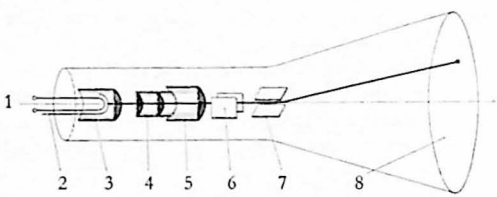



Bild 15
Meßwerk eines Quadrantenelektrometers

## Elektronenstrahlröhre

*Wirkungsweise:* Im Hochvakuum des Glaskolbens emittiert die geheizte Kathode 2 (Bild 16) frei bewegliche Elektronen. Der der Kathode in der Anordnung folgende Wehnelt-Zylinder 3 steuert die Menge der Elektronen, die in einer Elektronenoptik (Feld der Linsenelektrode 4) zum Strahl zusammengefaßt und von der Anode 5 beschleunigt werden. Der Elektronenoptik sind zwei Plattenpaare senkrecht zueinander nachgeordnet, die zur Ablenkung des Strahles aus der Mittellage dienen. Das Plattenpaar 6 ($x$-Ablenkung) wird meist an einen „Zeitablenkkreis" gelegt, das Plattenpaar 7 ($y$-Ablenkung) an die zu messende Spannung. Der Elektronenstrahl, durch Wahl der Potentiale von 4 so fokussiert, daß der Brennpunkt auf den Schirm zu liegen kommt, regt an der Aufprallstelle die Leuchtschicht zum Leuchten (Fluoreszenz oder Phosphoreszenz) an. Dadurch wird die unter dem Einfluß der Ablenkfelder entstehende Strahlspur sichtbar, also der Verlauf der Meßgröße in kartesischen Koordinaten abgebildet.




1 Heizung
2 Kathode
3 Wehnelt-Zylinder
4 Linsenelektrode
5 Anode
6, 7 Ablenkplatten
8 Bildschirm

Bild 16 Aufbau einer Elektronenstrahlröhre (Braunsche Röhre)

Viele Elektronenstrahlröhren sind mit einer weiteren Anode, einer Nachbeschleunigungsanode, ausgestattet, deren Feld den Elektronenstrahl nach der Ablenkung noch beschleunigen soll, um eine erhöhte Helligkeit der Leuchtschrift zu erzielen.

*Eigenart:* Elektronenstrahlröhren sind praktisch trägheitslose Meßwerke. Sie werden hauptsächlich zum Aufzeichnen von Spannungsvorgängen in Abhängigkeit von der Zeit verwendet. Man kann mit ihnen aber auch das Diagramm einer Spannung im Verhältnis zu einer anderen Spannung aufzeichnen. Eine wichtige Eigenschaft ist die Nachleuchtdauer des Leucht-

schirmes. Für langsam veränderliche Vorgänge fordert man eine sehr lange, für fotografische Aufnahmen schnell veränderlicher Vorgänge eine äußerst kurze Nachleuchtzeit.

## Bimetallmeßwerk

*Wirkungsweise:* An der kräftigen Meßwerksachse (Bild 17) greift die Wickelfeder 2 aus Bimetallblech an. Sie erwärmt und verformt sich, wenn der über 1 zugeführte Strom hindurchfließt, und dreht die Meßwerksachse. Von der Scheibe 3 gegen Wärmestrahlung geschützt, greift noch eine zweite, gleichartige Bimetallfeder 4 im umgekehrten Drehsinn an der Achse an. Sie bleibt jedoch stromlos, so daß von ihr Veränderungen der Raumtemperatur kompensiert werden.

*Eigenart:* Das Bimetallmeßwerk hat eine Beruhigungszeit von etwa 10 min. Kurz dauernde Stromspitzen, die die Wickelfeder 2 nur wenig erwärmen, tragen nur unwesentlich zum Zeigerausschlag bei, Dauerbelastungen führen dagegen zu einer Anzeige. Das ausgeübte Drehmoment ist etwa tausendmal größer als das anderer Meßwerke. Deshalb kann der Zeiger einen Schleppzeiger zum nachträglichen Ablesen des jeweils erreichten Höchstwertes mitnehmen.

1 Stromzuführungen
2 Stromdurchflossene Bimetallfeder
3 Schutzscheibe (geschnitten) gegen Wärmestrahlung
4 Bimetall-Kompensationsfeder

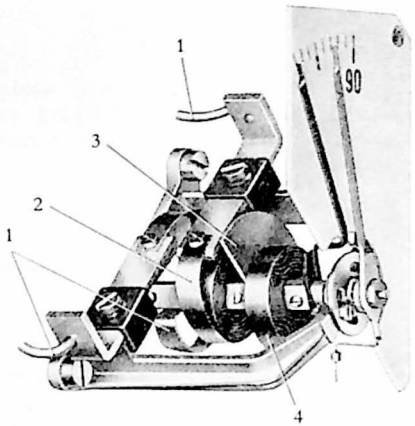
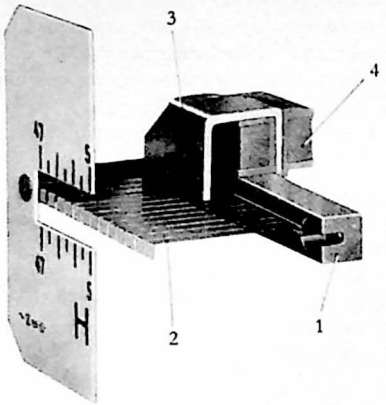



Bild 17
Bimetallmeßwerk für Betriebsinstrumente

## Vibrationsmeßwerk

*Wirkungsweise:* Eine Reihe von federnden Zungen (Bild 18), die auf einem gemeinsamen Zungenkamm sitzen und auf verschiedene Eigenschwin-

gungszahlen abgestimmt sind, wird von einem Elektromagnet zu mechanischen Schwingungen entsprechend der zu messenden Frequenz angeregt. Die mit der Frequenz in Resonanz stehende Zunge schwingt mit großer Amplitude und gibt so, deutlich ablesbar, den Meßwert an.




1 Zungenkamm
2 Stahlzunge
3 Magnetkern
4 Magnetspule

Bild 18
Vibrationsmeßwerk eines Zungenfrequenzmessers (Betriebsinstrument)

*Eigenart:* Zungenfrequenzmesser werden durch äußere Magnetfelder praktisch nicht beeinflußt und sind weitgehend unabhängig von der Kurvenform und von Spannungsschwankungen des Wechselstromes.

## Ausführungen elektrischer Anzeigeinstrumente

Entsprechend der Klasseneinteilung elektrischer Meßgeräte (Tafel 22, S. 29) werden Betriebsinstrumente und Feinmeßinstrumente (S. 55) unterschieden.

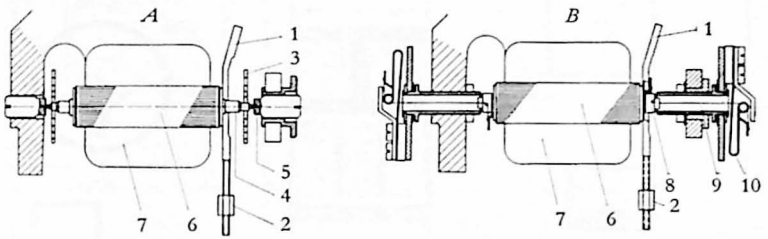
### Betriebsinstrumente

Anzeigende elektrische Betriebsinstrumente kann man einteilen in:

Schalttafelinstrumente,
tragbare Betriebsinstrumente und
Tischinstrumente.

Die eingebauten Meßwerke sind vielfach gleich oder nur in der Größe verschieden.

Neben der bekannten *Lagerung* des beweglichen Organs in Spitzen (Bild 19 A) wird, mit Ausnahme bei richtkraftlosen Meßwerken (z. B. Leistungsfaktormessern), häufig die Lagerung zwischen kurzen Spannbändern (Bild 19 B) angewendet. Sie macht das Meßwerk erschütterungsfester, weil die Spannbänder sich nicht abnutzen, und bringt auch einen Gewinn an Empfindlichkeit.

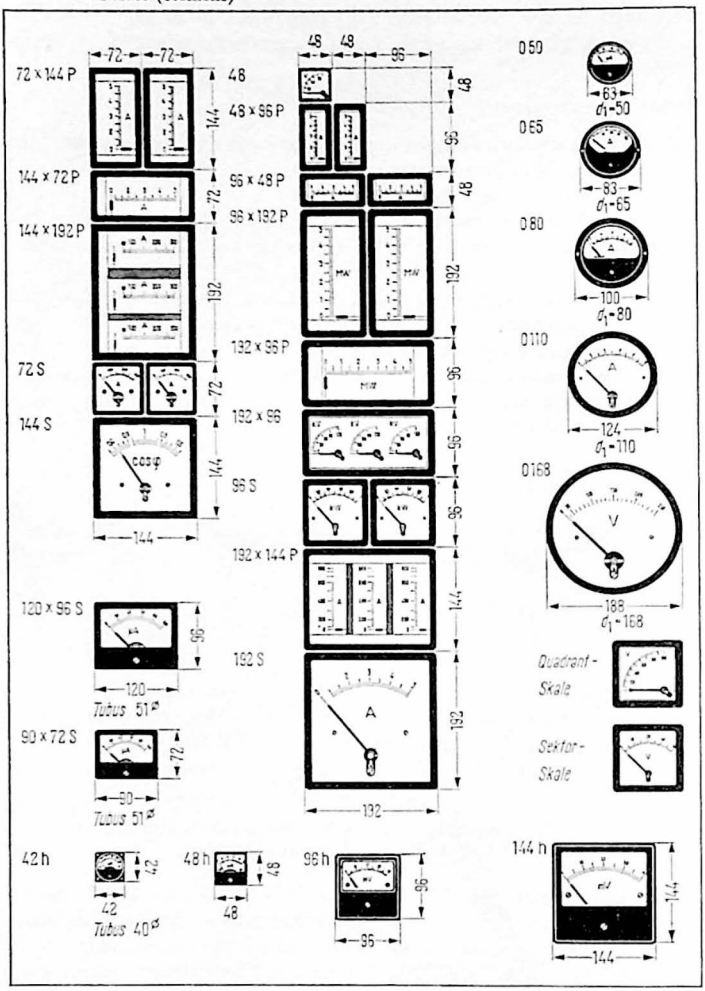



1 Zeigeransatz
2 Ausgleichsgewichte
3 Richtkraftfeder und Stromzuführung
4 Lagerspitze
5 Lagerstein
6 Drehspule
7 Weicheisenkern
8 Abfänger
9 Spannband
10 Spannfeder

Bild 19 Lagerung des beweglichen Organs eines Drehspulmeßwerks
*A* Spitzenlagerung, *B* Spannbandlagerung

**Schalttafelinstrumente.** Für sie gelten DIN 43700 und 43701. Normgemäß bezeichnet werden die *Instrumentgrößen* bei quadratischen und rechteckigen Frontrahmen nach den Frontrahmenmaßen (z. B. Gehäuse 144×72 DIN 43700), bei runden Frontrahmen jedoch nach

**Tafel 29** Form- und Größenbezeichnungen von Instrumenten für Schalttafeln und Geräte (Siemens)



dem für die Tafelausnehmung maßgebenden Gehäusedurchmesser $d_1$ (z. B. Gehäuse 65 DIN 43700). In den Siemens-Typbezeichnungen werden Gehäuseform und -größe in ähnlicher Weise angegeben. Wie der Tafel 29 zu entnehmen ist, haben die Bezeichnungen der Rundinstrumente jedoch eine Null als Vorziffer; ein Buchstabe hinter der zahlenmäßigen Kennzeichnung weist auf eine besondere Skalenausführung hin: S Sektorskale, P Profilskale, h halbverdeckte Skale. (Die Art des Meßwerks wird durch einen oder mehrere Buchstaben vor den Zahlen gekennzeichnet.) Über die in Tafel 29 aufgeführten Instrumentgrößen hinaus sind noch folgende erhältlich: $72 \times 36$ und $48 \times 24$.

Profilinstrumente werden normalerweise mit Flachprofil (Bild 20) und in Querformat geliefert. Es gibt aber auch sogenannte Kreisprofilinstrumente (Bild 21). Bei Flachprofilinstrumenten in Querformat spielt der Zeiger unter der Skale, bei solchen in Hochformat rechts neben der Skale, bei Kreisprofilinstrumenten dagegeben über oder links der Skale.

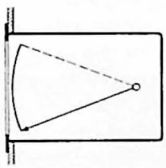


Bild 20
Flachprofil. Gerade Glasscheibe, schwach gekrümmte Skale

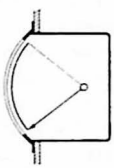


Bild 21
Kreisprofil. Skale und Glasscheibe in gleicher Weise gekrümmt

Die verschiedenen *Zeigerausführungen*, die bei Schalttafelinstrumenten verwendet werden, zeigt Bild 22. — Der *Nullpunktrücker* ist bei Instrumenten mit quadratischem oder rundem Frontrahmen von vorn, bei rechteckigen von hinten zugänglich. Instrumente mit Drehmagnetmeßwerk, mit Quotientenmeßwerk oder mit unterdrücktem Nullpunkt haben keinen Nullpunktrücker.

Die *Skalen* sind in kombinierter Grob-Feinteilung (Bild 23) ausgeführt, die aus größerer Entfernung ausreichend genau und aus der Nähe entsprechend der Klasse abgelesen werden kann. Eine Beleuchtung der Skale von hinten ist bei einigen Typen möglich. Auch gibt es Schalttafelinstrumente $192 \times 96$ mit Lichtmarkenablesung (s. S. 61), und zwar um geringsten Eigenverbrauch oder kürzeste Beruhigungszeiten zu erreichen, z. B.

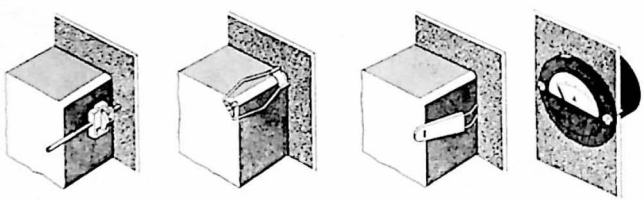
Bild 22 Zeiger für Schalttafelinstrumente
Links: Stabzeiger; Mitte: Profilinstrumentzeiger;
Rechts: Feinskalenzeiger

Bild 23
Skale einer SPANNUNGSLUPE (Maßstab 1:2,5)

bei Einrichtungen für Serienprüfungen. Die Forderung nach erhöhter Empfindlichkeit bei Wechsel- und Gleichspannungsmessungen wird durch die SPANNUNGSLUPE erfüllt: Instrumente 144, 144×72 P und 192×96 P mit Drehspulmeßwerk sind mit einer Zenerdiode so ausgelegt, daß der interessierende Meßbereich weit auseinandergezogen ist.

Schalttafelinstrumente 144×72 P sind auch mit einem oder zwei eingebauten *elektronischen Grenzwertmeldern* erhältlich. Der gewünschte Grenzwert wird von außen an zwei im Gehäuse sich gegenüber angeordneten und miteinander verschiebbaren kleinen Spulen eingestellt. Sie bilden die Schwingkreis- und die Rückkopplungsspulen eines HF-Oszillators. Gelangt eine starr mit dem Zeiger verbundene Schirmfahne beim Erreichen des eingestellten Grenzwertes zwischen die beiden Spulen, dann wird die Oszillatorschwingung unterbrochen und über eine Kippstufe ein Schalttransistor gesteuert, der zur Signalgabe ein Starkstromrelais betätigt.

Schalttafelinstrumente werden von hinten angeschlossen. Die verschiedenen Arten für ihre *Befestigung* zeigt Bild 24. Während die Spannschrauben



*A* Spannschrauben *B* Spannfedern *C* Schnappfedern *D* Schrauben

Bild 24 Befestigungsarten von Schalttafelinstrumenten

und Spannfedern nur eine Befestigung von hinten zulassen und die Befestigungsschrauben nur eine von vorn, ermöglichen die Schnappfedern beides.

**Tragbare Betriebsinstrumente.** *Im engeren Sinne:* Strom-, Spannungs-, Frequenz- und Wirk- oder Blindleistungsmesser in kräftigen, mit Tragriemen versehenen Gehäusen aus Holz oder Isolierpreßstoff (Bild 25). Meistens haben sie Anschlußklemmen für mehrere Meßbereiche und eine Mehrfachskale (Bild 26). Leistungsmesser dieser Art gibt es 1-, 2- oder 3systemig. Sie sind meistens im Spannungspfad für 125—250—500 V umschaltbar und im Strompfad für 5 A ausgelegt. Sie können ohne weiteres für die Nennspannungen 110—220—380 V verwendet und an Spannungs- und Stromwandler angeschlossen werden. — Für bestimmte Aufgabengebiete werden auch kombinierte Instrumente entsprechend dem anlagentechnisch gegebenen Bedarf ausgeführt, z.B. als Postausführung mit den Bereichen 450 mV (zum Anschluß an die in Übertragungsgeräten eingebauten Vor- oder Nebenwiderstände), 3 V, 30 V, 150 V, 300 V Gleich- und Wechselspannung (15 bis 100 Hz). — Für praktisch leistungs-

Bild 25
Tragbares Betriebsinstrument

Bild 26 Mehrfachskale eines tragbaren Strommessers (Maßstab 1:2,5)

lose Gleichspannungsmessungen (vgl. S. 133) gibt es zwei Spannband-Drehspulinstrumente mit jeweils sechs Bereichen zwischen 1 und 300 V bzw. zwischen 0,1 und 30 V. Die für den Eigenverbrauch charakteristische Größe $1/I$ (s. S. 27) beträgt bei beiden 1 MΩ/V, so daß bei Vollausschlag $P_e = U_n \cdot 1\,\mu A$ ist. Die Instrumente sind also auch als Strommesser mit dem Meßbereich 1 μA verwendbar. (Im Gegensatz zu den elektrostatischen und elektronischen Meßgeräten für derartige Messungen brauchen die Drehspulinstrumente keine Stromversorgung, und sie sind ohne zusätzliche Justierung stets meßbereit.) — Gebrauchslage der tragbaren Betriebsinstrumente meist waagerecht!

Auch das MULTITRON (Bild 27) ist ein tragbares Betriebsinstrument, und zwar ein Vielfach-Meßgerät mit extrem niedrigem Eigenverbrauch zum Messen positiver und negativer Gleichspannungen, von Wechselspannungen bis zu höchsten Frequenzen sowie von Widerständen. — Eine zu messende Gleichspannung wird über eine Tastspitze mit 1 MΩ ohmschen Widerstand an das eine Gitter einer Doppeltriode gelegt, während das andere auf konstanter Spannung gehalten wird, so daß ein meßwertproportionaler Spannungsunterschied an den Anoden entsteht. Dieser wird von einem eingebauten Drehspulinstrument an einer 100°-Skale angezeigt. Der kleinste Meßbereich beträgt 1,5 V, der größte (über einen siebenteiligen ohmschen Eingangsspannungsteiler) 1500 V. Mit einem Hochspannungstaster, der den Eingangswiderstand auf 2000 MΩ erhöht, lassen sich Spannungen bis max 30 kV messen. — Wechselspannungen (30 Hz bis 3 MHz oder bei kapazitätsarmem Aufbau der Schaltung bis 7,5 MHz) werden erst nach Gleichrichtung dem Eingangsspannungsteiler zugeführt. Sie sind an den „$V_{ss}$"-Skalen ($u_{ss}$ = 4,2 bis 4200 V) abzulesen; bei reiner Sinusspannung kann an den „$V_{eff}$"-Skalen der Effektivwert abgelesen werden ($u_{eff}$ = 1,5 bis 1500 V). Mittels HF-Tastrichter mit eingebauter Germanium-Spitzendiode lassen sich auch HF-Spannungen (100 kHz bis 250 MHz) bis $u_{eff}$ = 15 V messen. — Für die Widerstandsmessung in den Bereichen 10 bis $10^7$ Ω wird ein zweiter Spannungsteiler benutzt, dessen jeweils eingeschalteter Widerstand mit dem zu messenden Widerstand und einer konstanten 1,5-V-Spannungsquelle in Reihe liegt. Der Spannungsabfall am Prüfling ist ein Maß für seinen Widerstandswert. — Ein optischer Skalenweiser kennzeichnet die abzulesende Skale.

Bild 27 MULTITRON

**Tischinstrumente.** Zum Gebrauch in Versuchs- und Prüffeldern sowie auf Montagen werden Tischinstrumente für Strom-, Spannungs- und Widerstandsmessungen heute meistens als Vielfach-Instrumente (z. B. MULTIZET-Serie, Bild 28 und Tafel 30, S. 56) hergestellt. In einem handlichen Isolierpreßstoffgehäuse ist neben dem spitzen- oder spannbandgelagerten Meßwerk alles eingebaut, was (wie Neben- und Vorwiderstände, Gleichrichter

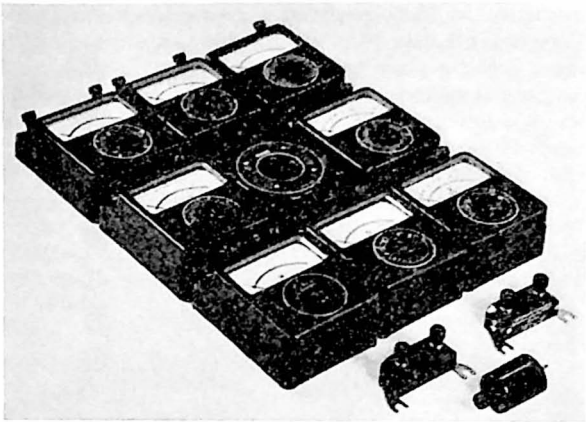


Bild 28 Geräte der MULTIZET-Serie.

mV-, μA- und HF-MULTIZET,
A-V-Ω-MULTIZET, Stromwandler Form Z und kHz-MULTIZET,
Leistungsmesser Form Z und Z-Ohmmeter I und II,
ansteckbarer Nebenwiderstand, ansteckbarer Kleinstromwandler,
ansteckbarer Vorwiderstand

und ggf. auch Wandler) erforderlich ist, um mit einem Drehschalter aus einer ganzen Anzahl von Meßbereichen den geeigneten wählen zu können (s. Bild 29 und Bild 102, S. 148). Bestimmte dieser Bereiche sind zum Anschluß meist ansteckbarer äußerer Neben- oder Vorwiderstände sowie Wandler ausgelegt. Als Stromquelle für Widerstandsmessungen muß in das Instrument eine halbe Stabbatterie eingesetzt werden.

Meistens ist der *Zeiger* als Messerzeiger ausgeführt und die *Skale* mit einem Spiegel unterlegt, damit man parallaxefrei ablesen kann. Dazu blickt man so auf die Skale, daß sich der Zeiger mit seinem Spiegelbild deckt. Oft ist für alle Meßbereiche eine gemeinsame Skale vorgesehen. Die Skalenbezifferung ist dann derart, daß sich jeweils aus dem Quotienten

$$\frac{\text{gewählter Meßbereich}}{\text{Meßbereichendwert der Skalenteilung}}$$

ein einfacher Faktor $K$ ergibt, mit dem man den gemessenen Wert $x$ errechnen kann:

$$x = K \cdot \text{abgelesenem Teilstrich-Wert.}$$

Beim Einschalten der Meßbereiche ist wie bei allen umschaltbaren Instrumenten Vorsicht geboten. Man tut gut daran, noch vor Anschluß des Instrumentes zunächst einen größeren Bereich einzuschalten, als man der Überlegung nach benötigen wird.

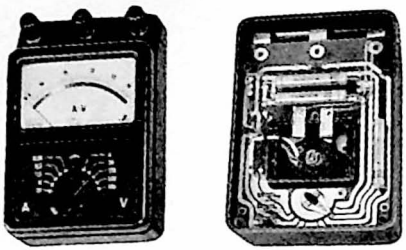



Bild 29 Dreheisen-MULTIZET

Auch für Leistungsmessungen und als Ohmmeter werden Tischinstrumente gebaut (s. Bild 28 und Bild 118, S. 160).

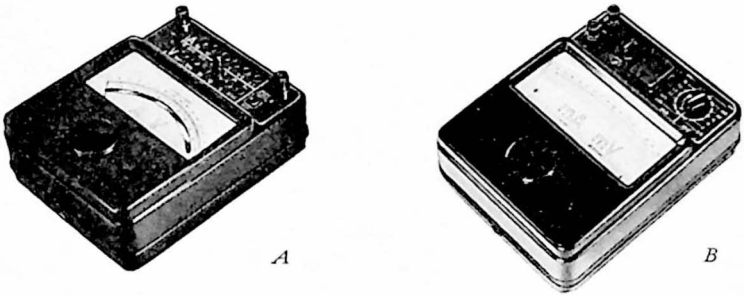
Für genaue Messungen sind folgende Punkte zu beachten:

1. Ruhige, annähernd waagerechte Lage des Meßgerätes.
2. Hinreichender Abstand von Eisenmassen (etwa 10 cm) und von Hochstrom führenden Gleichstromleitern. — Ist das nicht möglich und sind starke Fremdfelder zu befürchten, so ist der Meßplatz auf Störfelder zu untersuchen.
3. Die Zeigerschneide muß sich bei stromlosem Meßgerät mit dem Skalenstrich Null decken (störungsfreie Aufstellung!). Gegebenenfalls ist der Zeiger durch Verstellen des Nullpunktrückers entsprechend einzustellen.
4. Putzen der Glasscheibe während der Messung vermeiden, da entstehende elektrische Aufladung den Zeigerausschlag beeinflußt. Man beseitigt eine derartige Aufladung durch leichtes Anhauchen der Glasscheibe.

Über die Auswahl von Betriebsinstrumenten s. Tafel 31, S. 58 und Tafel 32, S. 59.

## Feinmeßinstrumente

Der Bau von Feinmeßinstrumenten setzt große Erfahrungen und einen beträchtlichen Aufwand für die Entwicklung und Fertigung voraus. Die wertvollen Dauermagnete sind bis zur völligen Konstanz gealtert. Eisen und Nickel kommen, soweit sie nicht aktiv sind, keinesfalls in das Meßwerk, nicht einmal in der Größenordnung von Spurenbeimischungen zu Metallegierungen oder gar zum Kupfer. Infektionen durch Stäubchen aller Art werden im Wernerwerk für Meßtechnik dadurch vermieden, daß man die Instrumente in klimatisierten, eisen-, nickel- und staubfreien Räumen montiert. (Die Gehäuse der Präzisionsinstrumente dürfen daher auch nicht in anderen Räumen geöffnet werden.) Wo Wirbelströme einen Fehlwinkel hervorrufen könnten, sind möglichst alle nichtaktiven Teile aus Isolierstoff.



*A* *B*

Bild 30 Ausführungen von Feinmeßinstrumenten

*A* Umschaltbares Zehnohm-Instrument, *B* Vielbereich-Strom- und Spannungsmesser

Die beweglichen Organe werden so leicht wie möglich gehalten. Bei der *Spitzenlagerung* sind die Stahlspitzen und ebenso die Pfannen in den Edelsteinen mit den als optimal erkannten Radien verrundet und poliert, um den Reibungsfehler bis zur erreichbaren Grenze klein zu halten. Während das obere Lager als Innenspitzenlager (Bild 31) in der Zeigerebene tragend ausgeführt ist, dient das untere als Führungslager. Dadurch kann sich der

Bild 31
Kippfehlerfreie Lagerung

**Tafel 30** Kleinste und größte Meßbereich-

| Instrument | Meßwerk | Spannungsabfall, $1/I$ für Vollausschlag, Stromaufnahme | Anzahl der Bereiche | Anzeigefehler ± | Gleichstrom dir. µA mA A | Neb.-W. A | dir. mV V kV | Vor.-W. kV |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| µA-MULTIZET | | $\Delta U$ = 100 bis 300 mV<br>$1/I$ = 50000 Ω/V | 13<br>8<br>4 | 1 %<br>1 %<br>1,5% | 20 10 | | 0,3 1 | |
| mV-MULTIZET | | $\Delta U$ = 10 bis 15 mV[1]<br>$1/I$ = 1000 Ω/V | 9<br>12<br>2 | 1 %<br>1 %<br>1,5% | 1 10 | 30 | 10 1 | |
| A-V-Ω-MULTIZET | | $\Delta U \approx 0{,}1$ V<br>$1/I$ = 1000 Ω/V<br>$\Delta U \approx 0{,}8$ V<br>$1/I$ = 1000 Ω/V | 7<br>7<br>6<br>6<br>1 | 1,5%<br>1,5%<br>1,5%<br>1,5%<br>1,5% | 0,6 6 | 30 | 60 0,6 | 1,5 |
| Dreheisen-MULTIZET | | $\Delta U$ = 1,3 bis 0,15 V<br>$I$ = 60 oder 5 mA | 5<br>5 | 1,5%<br>1,5% | 60 30 | | 6 0,6 | 1,5 |
| kHz-MULTIZET | | | 12<br>12 | 2,5%<br>2,5% | | | | |
| HF-MULTIZET | | | 6[2]<br>6[3]<br>5[4] | 5%[5]<br>5%[5]<br>5% | | | | |
| Z-Ohmmeter I | | | 5 | 1,5% | | | | |
| Z-Ohmmeter II | | | 6 | 1,5% | | | | |

[1]) Ausnahmen: Bereiche 1 A (30 mV), 3 A (55 mV), 10 A (150 mV).

[2]) Gleichspannung unzulässig.

[3]) Überlagerte Gleichspannung bis 300 V zulässig.

endwerte von MULTIZET-Instrumenten

| Wechselstrom | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 50-Hz-Bereich | | | | kHz-Bereich | MHz-Bereich | Ω kΩ MΩ |
| dir. mA A | Wandler kA | dir. V kV | Vor.-W. kV | | | |
| | | | | | | 5 5 |
| | | | | | | 1<br>10 |
| 3 6 | 0,6 | 3 0,6 | 1,5 | bis 5 kHz<br>bis 5 kHz | | 0,1 |
| 60 30 | 0,6 | 6 0,6 | 1,5 | bis 0,4 kHz<br>bis 0,15 kHz | | |
| 1 5 | | 0,1 0,5 | | bis 10 kHz<br>bis 10 kHz | | |
| | | V V<br>Eff.-Wert<br>0,25 20 | | V V<br>Eff.-Wert<br>0,25 20 [6] | V kV<br>Eff.-Wert<br>bis 450 MHz<br>bis 450 MHz<br>50 1 [7] bis 450 MHz | |
| | | | | | | 2<br>200 |
| | | | | | | 1 100 |

[4]) Mit kapazitivem Spannungsteiler.
[5]) Ausnahme: Bereich 0,25 V Eff.-Wert (10%).
[6]) Je nach Bereich ab 6 oder 100 kHz. [7]) Je nach Bereich ab 0,2 oder 1,5 MHz.

**Tafel 31** Kleinste und größte Meßbereichendwerte oder Anschlußwerte von Anzeigeinstrumenten
*N* Nebenwiderstand, *V* Vorwiderstand, *S* Spannungsteiler, *W* Wandler

| Meßwerk | Betriebsinstrumente | | | Feinmeßinstrumente |
|---|---|---|---|---|
| | Schalttafelinstrumente | Tragbare Betriebsinstrumente | Tischinstrumente | |
| | 1 µA 100 A<br>über *N* bis 15 kA<br>10 mV[1]) 1,5 kV<br>über *S* bis 15 kV | 1 µA 60 A<br>über *N* bis 15 kA<br>0,1 V 600 V<br>MULTITRON<br>1,5 V 30 kV | 20 µA 10 A<br>über *N* bis 30 A<br>10 mV 1 kV | 0,3 µA 30 A<br>über *N* bis 1,5 kA<br>0,3 mV 1 kV<br>über *V* bis 4,5 kV |
| | 250 µA 6 A<br>über *W* bis ...<br><br>6 V 1,5 kV<br>über *S* bis 15 kV<br>über *W* bis ... | <br><br>450 mV 300 V<br>MULTITRON<br>1,5 V 1,5 kV | 0,6 mA 6 A<br>über *N* bis 30 A<br>über *W* bis 600 A<br>60 mV 600 V<br>über *V* bis 1,5 kV | |
| | 400 µA 25 A<br>über *N* bis 15 kA<br>4 V 600 V | | | |
| | 100 mA[2]) 400 A<br>über *W* bis ...<br>10 V[3]) 600 V<br>über *W* bis ... | 1 A 250 A<br>über *W* bis ...<br>15 V 600 V | 60 mA 30 A<br>über *W* bis 600 A<br>6 V 600 V<br>über *V* bis 1,5 kV | 1 mA 12 A<br>über *W* bis 8 kA<br>1,5 V 750 V<br>über *V* bis 3 kV<br>über *W* bis ... |
| | für Wandleranschluß x/5 A | | | |
| | | | | — —<br>20 V 240 V |
| | Wirk- und Blindleistungsmesser:<br>100 b. 500 V/1 od. 5 A \| 125 bis 500 V/5 A<br>darüber jeweils über *W* | | Wirkleistungsm.:<br>25 und 125 V/5 A<br>über *V* bis 500 V | |
| | Leistungsfaktormesser:<br>100 b. 500 V/1 od. 5 A \| 110 bis 380 V/5 A<br>darüber jeweils über *W* | | | |
| | | | | Wirk-/Blindlm.:<br>3 bis 220 V/<br>2,5 mA bis 10 A<br>darüber jeweils<br>über *W*<br>über *V* bis 600 V |

Für Lichtmarken-Einbauinstrument (s. S. 49): [1]) 1 mV. [2]) 250 µA. [3]) 40 mV.

**Tafel 32** Eigenverbrauch von Betriebsinstrumenten

| Meßwerk | Meßgröße | Eigenverbrauch etwa | Anmerkungen |
|---|---|---|---|
| | Gleichstrom | 0,01 bis 3 µW [1]<br>4 bis 60 µW [1]<br>0,1 bis 0,5 mW [1] | bei Meßbereichen 1 bis 15 µA<br>25 bis 250 µA<br>400 µA bis 10 mA |
| | Gleichspannung | $I_n \cdot 60$ mV [1]<br>$U_n \cdot 1$ mA [1] [2] | $I_n > 10$ mA<br>$U_n \geq 100$ mV<br>für $U_n < 100$ mV teilw. größerer Eigenverbrauch (bis $U_n \cdot 5$ mA) |
| | Wechselstrom | $I_n \cdot 1$ V<br>0,25 VA | bei Meßbereichen $I_n \leq 150$ mA<br>$I_n \geq 250$ mA |
| | Wechselspannung | $U_n \cdot 1$ mA | |
|  | Wechselstrom<br>Wechselspannung | 0,1 bis 1 VA [1]<br>1 bis 5 VA [1] | |
|  | Wechselstrom | 3,6 VA | |
| | Leistung | Strompfad 1,4 W; 2,5 VA \| Spgs.-pfad bei 100 V 0,6 W | cos $\varphi = 1$ bis 0,5 |
| | Leistungsfaktor | Strompfad 3 W; 5 VA \| Spgs.-pfad bei 100 V 2,5 W 2,9 W | Einphasenstrom<br>Drehstrom |
| | | Strompfad 15 VA \| Spgs.-pfad 5 VA 3,3 VA | Leistungsfaktormesser mit Ringskale für wechselnde Energierichtung. cos $\varphi = 2 \times 0 - 1 - 0$<br>Einphasenstrom<br>Drehstrom |
| | Frequenz | 7 VA | 110 V |
|  | Frequenz | 2 bis 2,5 VA<br>4 bis 5 VA<br>7 bis 8 VA<br>9 bis 10 VA | 100 und 110 V<br>220 V<br>380 V<br>500 V |
| Synchronoskop | Phase | Stator 20 VA \| Rotor je Leiter 2 VA 4 VA 7 VA | 100 und 110 V<br>220 V<br>380 V |

[1]) Bei Lichtmarken-Einbauinstrumenten meist bedeutend kleiner.
[2]) Bei wärmetechnischen Geräten kleiner.

**Tafel 33** Eigenverbrauch von Feinmeßinstrumenten

| Meßwerk | Meßgröße | Eigenverbrauch etwa | Anmerkungen |
|---|---|---|---|
| | **Präzisionsinstrumente für Gleichstrom** (vgl. Tafel 47, S. 116) | | |
| | | *Zehnohm-Instrument* | |
| | Strom | $I_n \cdot 3$ V | $I_n = 3$ mA bei Meßbereich 3 V (1 kΩ) |
| | Spannung | $I_n \cdot 45$ bis 60 mV | $I_n = 15$ mA bis 1500 A bei Meßber. 45 mV |
| | | $U_n \cdot 4{,}5$ mA | $U_n = 45$ mV bis 1,5 V bei Meßber. 45 mV |
| | | $U_n \cdot 3$ mA | $U_n = 3$ V bis 4,5 kV bei Meßber. 3 V (1 kΩ) |
| | | *Umschaltbares Zehnohm-Instrument* | |
| | | wie Zehnohm-Instrument, ferner: | |
| | Strom | $I_n \cdot 70$ bis 110 mV | $I_n = 0{,}1$ bis 30 A (entspr. den Meßber.) |
| | Spannung | $U_n \cdot 4{,}5$ mA | $U_n = 60$ mV (entspr. dem Meßbereich) |
| | | $U_n \cdot 3$ mA | $U_n = 10$ bis 300 V (entspr. den Meßber.) |
| | | *Umschaltbarer Spannungsmesser* | |
| ∩ | Spannung | $U_n \cdot 3$ mA | $U_n = 3$ V bis 4,5 kV bei Meßber. 3 V b. 1 kV |
| | **Hochempfindliche Lichtmarken-Instrumente für Gleichstrom** | | |
| | | *Mehrbereich-Strommesser* | |
| | Strom | $I_n \cdot 3$ mV | $I_n = 1$ µA (entspr. dem Meßbereich) |
| | | $I_n \cdot 8$ bis 11 mV | $I_n = 3$ bis 100 µA (entspr. den Meßber.) |
| | | *Mehrbereich-Spannungsmesser* | |
| | Spannung | $U_n \cdot 10$ µA | $U_n = 1$ bis 100 mV (entspr. den Meßber.) |
| | | *Vielbereich-Strom- und -Spannungsmesser* | |
| | | mit Außenmagnetmeßwerk | |
| | Strom | $I_n \cdot 0{,}26$ bis 1,6 mV | $I_n = 15$ µA b. 30 mA (entspr. den Meßber.) |
| | Spannung | $U_n \cdot 15$ µA | $U_n = 0{,}75$ mV b. 1,5 V (entspr. d. Meßber.) |
| | | mit Kernmagnetmeßwerk | |
| | Strom | $I_n \cdot 5$ mV | $I_n = 0{,}1$ bis 30 m A (entspr. den Meßber.) |
| | Spannung | $U_n \cdot 0{,}08$ mA | $U_n = 10$ mV bis 1 V (entspr. den Meßber.) |
| | **Präzisions-Strom- u. -Spannungsmesser f. Wechsel- u. Gleichstrom** | | |
| | | *Strommesser* | |
| | Strom | < 1 VA | bei Meßbereichen 0,03 bis 12 A |
| | | *Spannungsmesser* | |
| ∿ | Spannung | $U_n \cdot 400$ bis 30 mA | $U_n = 15$ bis 600 V (entspr. den Meßber.) |
| | **Hochempfindliche Dreheisen-Präzisionsinstrumente** | | |
| | | *Strommesser* | |
| | Strom | 0,003 VA | bei Meßbereichen 1 bis 30 mA |
| | | 0,01, 0,03, 0,14 VA | bei Meßbereichen 1,2, 2,5, 6 A |
| | | *Spannungsmesser* | |
| | Spannung | $U_n \cdot 30$ bis 7,5 mA | $U_n = 1{,}5$ bis 15 V (entspr. den Meßber.) |
| | | $U_n \cdot 1$ mA | $U_n = 30$ bis 750 V (entspr. den Meßber.) |
| ⏚ | | *Lichtmarken-Universalelektrometer* | |
| | Spannung | $0{,}6$ bis $75 \cdot 10^{-3}$ VA | bei Meßbereichen 20 bis 240 V |

**Tafel 33** (Forts.) Eigenverbrauch von Feinmeßinstrumenten

| Meßwerk | Meßgröße | Eigenverbrauch etwa | Anmerkungen |
|---|---|---|---|
| | | *Astatische Präzisions-Leistungsmesser* | |
| | Leistung | Strompfad / Spgs.-pfad | |
| | | 0,3 VA / $U_n \cdot 30$ mA | bei $U_n = 90$ bis 220 V (entspr. d. Meßber.) |
| | | *Präzisions-Milliwattmeter* | |
| | Leistung | Strompfad / Spgs. pfad | |
| | | 75 mVA / $U_n \cdot 1$ mA | $U_n = 3$ bis 15 V |
| | | 0,75 mVA / $U_n \cdot 10$ mA | $U_n = 30$ bis 150 V (entspr. d. Meßber.) |

Zeiger kippfehlerfrei einstellen. Die aus Bronze bestehenden Richtkraftfedern sind paarweise auf das sorgfältigste ausgesucht. Der *Zeiger*, der außerordentlich leicht, aber dennoch stabil ist, läuft in eine Fadenspitze von nur 0,1 Skalenteil-Abstand aus, so daß die Zehntel zwischen den Skalenteilen leicht abzuschätzen sind. Sein Ausschlag beträgt max 85°.

Man kann die Empfindlichkeit eines Meßwerks steigern, indem man das Richtmoment vermindert, findet dabei aber bei Spitzenlagerung eine durch den Reibungsfehler gesetzte Grenze. Hochempfindliche Instrumente haben deshalb ein in *Spannbändern* gelagertes bewegliches Organ (s. Bild 19 *B*, S. 47), so daß ein Reibungsfehler nicht auftritt. Die Spannbänder werden von Federn, die zum Justieren in drehbaren Köpfen sitzen, straff gehalten. Sie dienen nötigenfalls auch der Stromzuführung und üben das Richtmoment aus. Ist völlige Nullpunktkonstanz nötig, bringt man auch zusätzliche Richtmoment-Spiralfedern an; man nimmt dann, der Genauigkeit wegen, eine Verminderung der durch die Spannbandlagerung um ein Vielfaches vergrößerten Empfindlichkeit in Kauf.

Durch Verlängern des Zeigers kann man die Empfindlichkeit nur so weit steigern, wie das Trägheitsmoment und die Festigkeit es zulassen. Die Grenze liegt bei etwa 100 mm Zeigerlänge. Darüber hinaus setzt man anstelle des körperlichen Zeigers den *Lichtzeiger*. Nachdem vom Wernerwerk für Meßtechnik zuerst Lichtmarken-Galvanometer mit eingebauter Optik und hohlkegelförmiger Skale gebaut worden sind, hat sich diese Bauart auch für verschiedene kalibrierte Instrumente durchgesetzt (Bild 32). Die Lichtmarke wird immer scharf abgebildet, und es ist einfach, größte Helligkeit einzustellen, weil Meßwerk und optisches System fest zusammengebaut sind (Bild 33). Üblicherweise ist der Lichtzeiger 300 mm

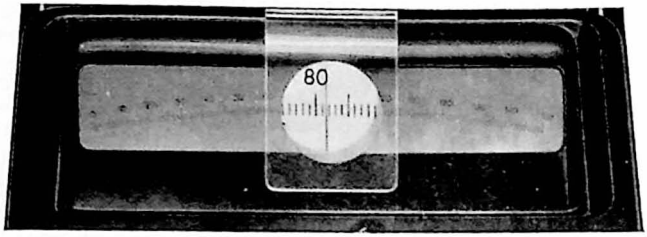
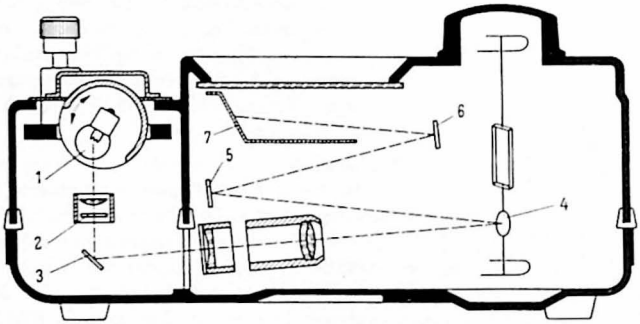



Bild 32 Skale eines Lichtmarken-Instrumentes mit Lichtschutzhaube und Ableselupe (Maßstab 1:2,5)

lang. Der Gewinn gegenüber einem körperlichen Zeiger ist aber beträchtlich größer, als ihn der Längenvergleich erscheinen läßt, weil die Reflexion des Lichtzeigers am Meßwerkspiegel den Zeigerausschlag gegenüber dem Ausschlag des beweglichen Organs verdoppelt. Man kann daher Meßwerke mit Lichtzeiger bauen, deren bewegliches Organ nur um wenige Winkelgrade auszuschlagen braucht. Das ist meßtechnisch bei elektrodynamischen Leistungsmessern ein Gewinn, weil das bewegliche Organ dadurch immer annähernd in demselben Feldbereich bleibt, so daß die Rückwirkung des Drehspulfeldes auf den Feldkreis, eine Ursache des Fehlwinkels, klein gehalten wird. Da die Lichtmarke unmittelbar auf der Skale abgebildet wird, können Parallaxefehler nicht vorkommen.




1 Glühlampe, 2 kreisförmige Blende mit Ablesemarke, 3 5 6 Umlenkspiegel, 4 Meßwerkspiegel, 7 Skale

Bild 33 Strahlengang in einem Lichtmarken-Instrument

Präzisions-Leistungsmeßwerke (eisenlos!) werden gegen *Fremdfeldeinflüsse* durch Astasierung oder Abschirmung geschützt (s. S. 40), Präzisions-Dreheisenmeßwerke durch Abschirmung (s. S. 42). Präzisionsinstrumente für Gleichstrom bedürfen wegen ihres starken Dauermagnetfeldes meist keines besonderen Fremdfeldschutzes.

Bei umschaltbaren Feinmeßinstrumenten kommt es auf besonders geringe *Übergangswiderstände* an. Diese lassen sich mit eigens dafür konstruierten Drehschaltern ebensowohl erreichen wie mit den dafür bekannten Stöpselanordnungen (vgl. Bild 30, S. 55).

Über die Auswahl von Feinmeßinstrumenten s. Tafel 31, S. 58 und Tafel 33, S. 60 bis 61.

Digital-Meßgeräte s. S. 108.

## Ausführungen elektrischer Schreiber

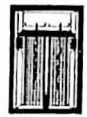
Meßgrößen, deren zeitlicher Verlauf genauer festgehalten werden soll, als es durch eine Reihe von Einzelablesungen an anzeigenden Instrumenten möglich ist, können mit elektrischen Schreibern (s. Tafel 34) registriert werden. Schreiberdiagramme sind weitaus übersichtlicher und bedeutend leichter auszuwerten als Zahlenreihen (vgl. S. 78), die meist erst in graphische Darstellungen verarbeitet werden müssen. Sie erfassen jede Meßwertänderung, die sonst zwischen zwei Einzelablesungen verloren gehen würde, liefern wertvolle Belege für den einwandfreien Ablauf von Betriebsvorgängen und ermöglichen es, Abweichungen rasch zu erkennen, besonders solche, die sich allmählich einschleichen.

Zum *Papiertransport* dient eine Stiftwalze, deren Stifte in Lochreihen eingreifen und das Papier von einer Vorratsrolle abziehen. Papierantriebe sind in der Hauptsache Synchronmotoren oder Federwerke, und zwar Federwerke mit Handaufzug (Laufzeiten zwischen 90 min und 15 Tagen) und mit elektrischem Aufzug (Gangreserven 6 bis 10 Stunden). Die mit Synchronmotoren erzeugten Vorschübe liegen zwischen 5 und 72000 mm/h und die mit Federwerken erzeugten zwischen 5 und 14400 mm/h. Ein Vorschubwechsel ist durch eine Getriebeumschaltung (Verhältnis meist 1:2:6, 1:3:6 oder 1:2:4) möglich oder durch einen Mehrgangantrieb (über das Getriebeumschaltverhältnis hinaus 1:12, 1:60 oder 1:120). Ist damit zu rechnen, daß der Meßwert schnell schwankt, und soll sein Verlauf in allen Einzelheiten festgehalten werden, so sollte der Vorschub so rasch sein, daß der Abstand der aufeinanderfolgenden Registrier-Linien $>0{,}5$ mm ist (vgl. Tafel 35).

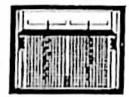
**Tafel 34** Elektrische Schreiber des Siemens-Schreiberprogramms

## Linienschreiber

288×288



192×288



288×240

192×240

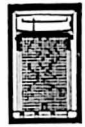
144×144

96×144

Meß- u. Zeitmarkierwerke, Verstärker

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Meßbereichanzahl | 2, 3 oder 4 | 1 oder 2 | 2, 3 oder 4 | 1 oder 2 | 1 oder 2 | 1 |
| Schreibbreiten (mm) | 2×100/3×60/4×45 | 120/2×50 | 2×100/3×60/4×45 | 120/2×50 | 100/2×45 | 60 |
| Sichtb. Diagr.-Länge (mm) | 190 | 190 | 140 | 140 | 90 | 90 |

## Punktschreiber



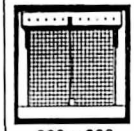
192×288
(192×240)

Meßwerke und Verstärker

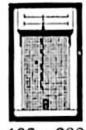
| | |
|---|---|
| Meßbereichanzahl | max 6 |
| Meßstellenanzahl | 1, 2, 3 oder 6 |
| Schreibbreiten (mm) | 120 |
| Sichtb. Diagr.-Länge (mm) | 190 |

## KOMPENSOGRAPH

### Kompensations-Linienschreiber



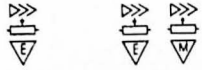
288×288



192×288

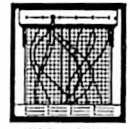
144×144

Meßwerke und Verstärker

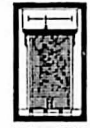


| | | | |
|---|---|---|---|
| Meßbereichanzahl | max 6 | max 3 | max 3 |
| Meßstellenanzahl | 1 | 1 | 1 oder 2 |
| Schreibbreiten (mm) | 210 | 120 | 100 |
| Sichtb. Diagr.-Länge (mm) | 190 | 190 | 90 |

### Kompensat.-Punktschreiber



288×288



192×288

| | | |
|---|---|---|
| Meßbereichanzahl | max 6 | max 3 |
| Meßstellenanzahl | 6 oder 12 | 6 |
| Schreibbreiten (mm) | 210 | 120 |
| Sichtb. Diagr.-Länge (mm) | 190 | 190 |

Grundsätzlich gibt es zwei Möglichkeiten, betriebsmäßig die Meßwerte elektrischer Meßgrößen aufzuzeichnen: Entweder der Ausschlag eines Meßwerkzeigers wird unmittelbar zum Aufzeichnen ausgenutzt oder das Schreiborgan wird von einer meßwertgesteuerten Hilfskraft bewegt.

Versieht man den Zeiger mit einem Schreiborgan, das dauernd mit dem Papier in Verbindung bleibt, so entsteht auf dem Papier ein Kurvenzug (*Linienschreiber*). Der Zeiger muß in diesem Fall wesentlich kräftiger sein als ein frei schwingender, und er muß, sofern man auf rechtwinkligen Koordinaten aufzeichnen will, eine sog. Geradführung haben. Beides, sowie das Überwinden der Reibung auf dem Papier, erfordert vom Meßwerk ein größeres Drehmoment als bei einem Anzeiger, und man kann daher nicht beliebig kleine Meßwerte auf diese Weise unmittelbar aufzeichnen. — Ein Anzeigermeßwerk kann aber verwendet werden, wenn der frei spielende Zeiger nur periodisch auf ein über das Papier gespanntes Farbband gedrückt wird. Man führt das Papier dazu über eine Schreibkante, die eine Sehne des vom Meßwerkzeiger beschriebenen Kreisbogens bildet, und gibt dem Zeiger eine Schneide; dort, wo beide sich beim Aufdrücken kreuzen, wird ein Punkt aufgezeichnet (*Punktschreiber*). Diese Sehnengeradführung ergibt eine ausreichende Linearität.

Läßt man das Schreiborgan von einer Hilfskraft führen, die von einer Kompensationsspannung durch Abgleich der Meßspannung gesteuert wird (KOMPENSOGRAPH), so kommt man zu einer Aufzeichnung, fast ohne die Meßstromquelle zu belasten, d.h., man kann eine als kleine Spannung auftretende Meßgröße auf langer Skale aufzeichnen.

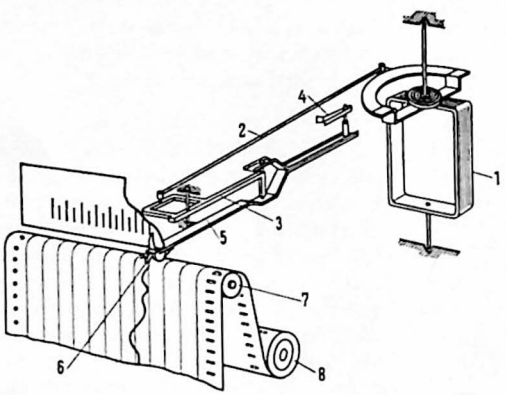
**Tafel 35** Empfehlenswerte Papiervorschübe bei verschiedener Häufigkeit von Meßwert-Schwankungen

| Mittlerer zeitlicher Abstand der Meßwert-Schwankungen | Mindest-Papiervorschub |
|---|---|
| s | mm/h |
| 90 | 20 |
| 30 | 60 |
| 15 | 120 |
| 6 | 300 |
| 3 | 600 |
| 1,5 | 1200 |
| 0,5 | 3600 |

Für die Auswahl eines Schreibers ist seine Empfindlichkeit durchaus nicht allein ausschlaggebend, weil HF-Schwingkreisverstärker (s. S. 74) verfügbar sind, über die man auch Spannungen von 6 mV und Ströme von 25 µA mit Linienschreibern aufzeichnen kann. Die gewünschte Auflösung des Diagramms, die Zahl der gleichzeitig aufzuzeichnenden Meßwerte (ggf. verschiedener Art), die Breite, in der das möglich ist, sowie die erwünschte Form der Aufzeichnung fallen ebenso ins Gewicht.

**Linienschreiber.** Mit diesen vor allem in der Starkstromtechnik verwendeten Schreibern kann man die Werte verschiedener Meßgrößen (z. B. Strom, Spannung, Leistung, cos $\varphi$, Frequenz) in den verschiedensten Kombinationen und Schreibbreiten (s. Tafel 34) gleichzeitig auf einem Papierstreifen aufzeichnen. Die Kombinationsmöglichkeiten werden lediglich vom Platzbedarf der erforderlichen Meßwerke und von den jeweils gewünschten Schreibbreiten begrenzt. Da man beim Linienschreiber auf eine Meßstellenumschaltung verzichten muß, ist auch beim gleichzeitigen Aufzeichnen gleicher Meßgrößen jeder ein Meßwerk zuzuteilen.

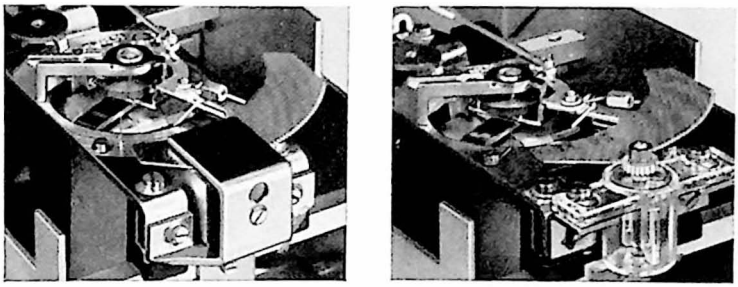
Die bei der Aufzeichnung in rechtwinkligen Koordinaten erforderliche *Geradführung* geschieht meist durch sogenannte Ellipsenlenker (Bild 34). Aufgezeichnet wird in der Mehrzahl aller Fälle mit Tinte auf Papier (*Tintenschreiber*). Die heute oft verwendete Kastenfeder faßt eine Tintenmenge für 50 m Schreibspur. Zur Dauerregistrierung werden die Schreiber mit einer Schreibkapillare ausgestattet, der die Tinte durch einen Schlauch aus einem Vorratsbehälter zugeführt wird. Der Inhalt dieses Tintentanks reicht für eine Schreibspurlänge von 4500 m aus. In besonderen Fällen ist auch eine Aufzeichnung auf Metallpapier möglich (*Metallpapierschreiber*): Unter einer Schreibelektrode schmilzt die dünne Metallschicht des Papiers.




1 Drehspule
2 Schubstange
3 Lenkarm
4 Führung
5 Schreibarm
6 Feder
7 Stiftwalze
8 Papiervorratsrolle

Bild 34 Linienschreiber mit Drehspulmeßwerk und Ellipsenlenker, schematisch

Die Meßwerke haben zum amplitudengetreuen Aufzeichnen eine *Wirbelstromdämpfung* (Bild 35 *A*). Diese kann zum Aufzeichnen stark schwankender Meßwerte auch gegen eine *Öldämpfung* (Bild 35 *B*) ausgetauscht werden. Durch Mischen einiger Dämpfungsöle in bestimmten Verhältnissen lassen sich Einstellzeiten zwischen 4 und 80 s erzielen.



*A* Wirbelstromdämpfung *B* Öldämpfung

Bild 35 Dämpfungen von Drehspulmeßwerken in Schreibern

Um die Kurven mit anderen Betriebsvorgängen, die zeitlich überwacht werden, in Zusammenhang zu bringen, können Linienschreiber im allgemeinen mit *Zeitmarkierwerken* ausgestattet werden, und zwar je nach Schreibergröße zwischen max 6 und 18. Ihre Feder oder Elektrode wird jeweils nur 1,5 mm ausgelenkt. Für das Aufzeichnen des zeitlichen Verlaufs von Netzstörungen erhalten die Schreiber ein Anregegerät zum Auslösen eines Schnellgangs, damit sie während einer Störung selbsttätig mit erhöhter Papiergeschwindigkeit (Metallpapier) arbeiten. Schreiber, die nur Zeitmarkierwerke enthalten (max etwa 40), dienen ausschließlich der zeitlichen Überwachung von Vorgängen der verschiedensten Art, wie z. B. zur Kontrolle der Maschinenausnutzung in einem Werkzeugmaschinenpark.

Linienschreiber für Wechselspannungsmessungen mit erhöhter Empfindlichkeit in einem bevorzugten Bereich arbeiten nach dem Prinzip der SPANNUNGSLUPE (s. S. 50).

Für zeitweiligen Einsatz an verschiedenen Orten, z. B. in Prüf- und Versuchsfeldern, werden Linienschreiber auch in *tragbarer* Ausführung gebaut (vgl. Bild 36), und zwar bevorzugt mit mehreren Meßbereichen. Am viel-

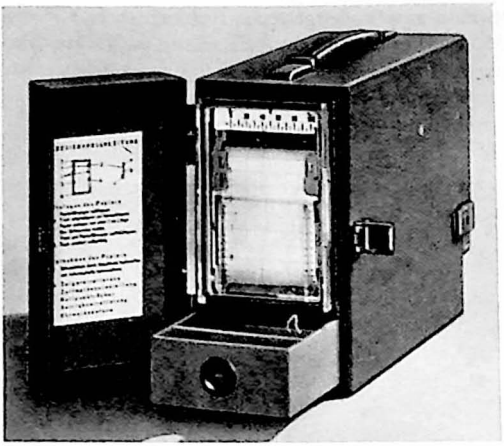
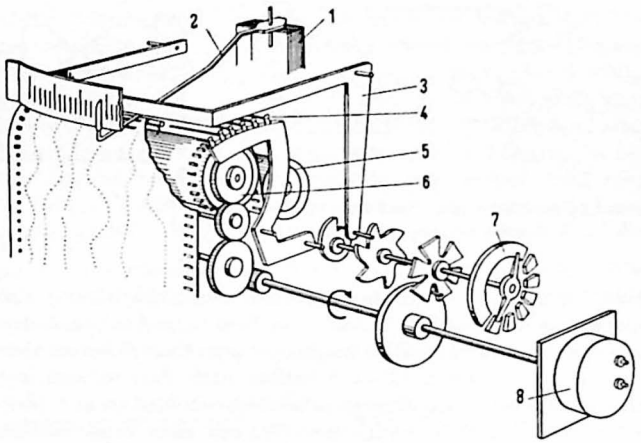


Bild 36
Tragbarer Linienschreiber 96×144

seitigsten anwendbar sind MULTIZET-Schreiber mit vorzuschaltenden Sonder-MULTIZET-Instrumenten. Es gibt Einfachschreiber (Schreibbreite 120 mm), an denen die Bereiche des A-V-Ω-, des μA- oder des mV-MULTIZET (s. Tafel 30, S. 56) eingeschaltet werden können und Zweifachschreiber (Schreibbreite 2×100 mm) für 2×A-V-Ω, 2×μA, 2×mV, A-V-Ω + μA, A-V-Ω + mV oder μA + mV. Alle MULTIZET-Schreiber haben Drehspulmeßwerke.

**Punktschreiber** (vgl. Tafel 34, S. 64). Der Zeiger des empfindlichen Meßwerks (geringer Eigenverbrauch, geringes Drehmoment) wird in bestimmten Zeitabständen von einem Fallbügel kurzzeitig auf das unter dem Zeigerende befindliche Farbband gedrückt und dieses wiederum auf den darunter ablaufenden Papierstreifen (Bild 37). Der Meßwert wird so als Farbpunkt aufgezeichnet, und die einzelnen Farbpunkte reihen sich zu einem Kurvenzug aneinander.

Ändern sich die Meßwerte nur langsam, dann kann das Meßwerk mit einem selbsttätigen Meßstellenumschalter nacheinander auf verschiedene Meßstellen (2, 3 oder 6) umgeschaltet werden. (Bei der Punktfolge von 20 s wird beim Sechsfarbenschreiber jeder Meßwert alle 2 min abgebildet.) Gleichzeitig mit der Meßstellenumschaltung wird das Farbband gewechselt, damit die einzelnen Kurven in verschiedenen Farben aufgezeichnet




1 Drehspule
2 Zeiger
3 Fallbügel
4 Farbbänder
5 Papiervorratsrolle
6 Stiftwalze
7 Meßstellenumschalter
8 Synchronmotor

Bild 37 Sechsfarben-Punktschreiber, schematisch

werden. Für jede der entstehenden Kurven steht die gesamte Schreibbreite zur Verfügung. *Mehrfarben-Punktschreiber* verwendet man insbesondere zum Aufzeichnen wärmetechnischer Meßwerte, die sich als Spannungen oder Widerstände erfassen lassen, so daß die verschiedensten Meßgrößen (z. B. °C, % $CO_2$ und % $O_2$) auf derselben Skale erscheinen.

Temperaturen werden mit Widerstandsthermometern oder mit Thermoelementen erfaßt. Im ersten Fall wäre ein Quotientenmeßwerk erforderlich, im zweiten ein Drehspulmeßwerk. Deshalb baut man, wenn beide Arten von Meßfühlern auf ein Meßwerk geschaltet werden sollen, ein *umschaltbares Parallelspulmeßwerk* ein: Hintereinanderschaltung der Spulen ergibt mit dem Richtmoment der Spannbänder die Wirkung eines Drehspulmeßwerks, eine Schaltung mit Anzapfung zwischen ihnen dagegen die Quotientenwirkung, bei der das Spannbandrichtmoment vernachlässigbar ist (Bild 38). Die Umschaltung wird vom Meßstellenschalter mit übernommen. Zum Auswerten der Kurven wird beim Justieren für jede Meßstelle ein Ableselineal hergestellt.

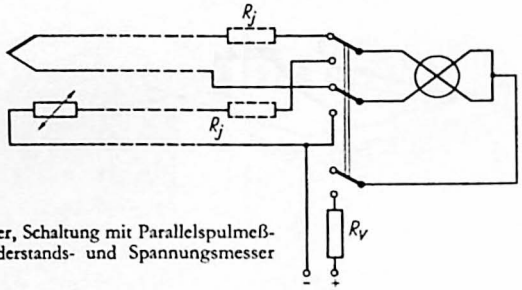
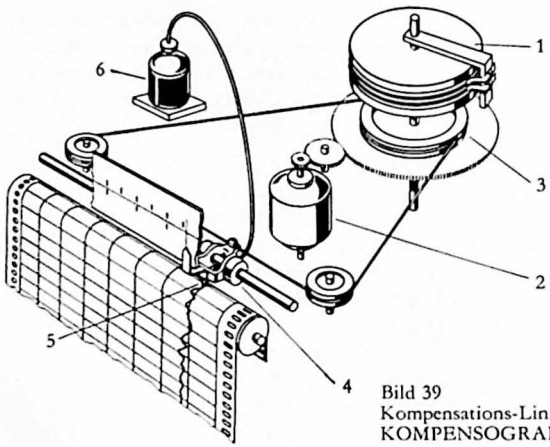



Bild 38 Punktschreiber, Schaltung mit Parallelspulmeßwerk als Widerstands- und Spannungsmesser

**KOMPENSOGRAPH.** Bei vielen Betriebsvorgängen in der Wärme- und Verfahrenstechnik reichen die mit Linien- und Punktschreibern nach dem Ausschlagsverfahren erzielbaren Genauigkeiten und Einstellzeiten nicht aus. Man verwendet in diesen Fällen Schreiber nach dem selbsttätigen Kompensationsverfahren. Diese Kompensationsschreiber haben kein Meßwerk im üblichen Sinne. Ihr Schreiborgan wird mit einer beträchtlichen Zugkraft parallel zur Skale geführt, deren Länge infolgedessen unabhängig vom Zeigerausschlagswinkel und von der Zeigerlänge bemessen werden kann. Ist nur ein Meßwert zu erfassen, so wird man einen *Kompensations-Linienschreiber* verwenden, zum Erfassen mehrerer Meßwerte dahingegen einen *Kompensations-Punktschreiber*. Die verschiedenen Ausführungen sind in Tafel 34, S. 64 zusammengestellt.




1 Abgleichpotentiometer
2 Meßmotor
3 Seilscheibe
4 Schreibwagen
5 Schreibfeder
6 Tintentank

Bild 39
Kompensations-Linienschreiber
KOMPENSOGRAPH, schematisch

Bei den Linienschreibern, deren mechanischen Aufbau Bild 39 zeigt, bewegt der Meßmotor einen Schreibwagen mit Tintenfeder (Versorgung aus Tinten-Vorratsbehälter). — Bei den Punktschreibern hat der Wagen einen Druckkopf für den Abdruck von zwei verschiedenen Zeichen (Punkt 0,5 mm ⌀ und Kreis 0,7 mm ⌀) in max sechs verschiedenen Farben, so daß 12 Kurven unterscheidbar aufgezeichnet werden können. In bestimmten Zeitabständen wird die jeder Meßstelle zugeordnete Zahl mitgedruckt. Die Zahlen sind so gestaffelt, daß sie selbst dann, wenn alle Kurven übereinander gedruckt werden, untereinander erscheinen.

Bild 40 zeigt die elektrische Wirkungsweise des KOMPENSOGRAPH. Die zu messende Gleichspannung wird mit der Ausgangsspannung (Kompensationsspannung) einer mit konstanter Spannung gespeisten Wheatstoneschen Brücke verglichen. Weichen die Spannungen voneinander ab,

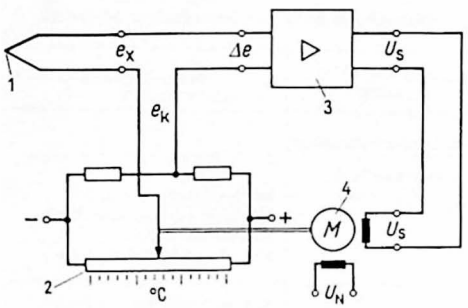



Bild 40 KOMPENSOGRAPH, elektrische Wirkungsweise

so entsteht, je nachdem ob die Kompensationsspannung größer oder kleiner ist, eine positive oder negative Differenz-Gleichspannung. Diese wird entweder einem elektronischen Verstärker (▽) mit Wechselrichtereingang oder einem Magnetikverstärker (▽) zugeführt. Die verstärkte Spannung wird schließlich an die Steuerwicklung des Meßmotors gelegt. Je nach Polarität der Differenz-Gleichspannung bewegt dieser den Abgriff des Abgleichpotentiometers in der Brücke nach rechts oder links, bis Meßspannung und Kompensationsspannung wieder gleich sind. Die Stellung des Abgriffes kennzeichnet dann den Wert der zu messenden Spannung und wird durch einen Seilzug auf die Anzeige- und Schreibvorrichtung übertragen; die Meßstromquelle ist unbelastet.

Den konstanten Hilfsstrom für die Brückenschaltung liefert eine mit Zenerdioden stabilisierte Spannungsquelle. Einflüsse von Temperatur, Frequenz und Netzspannungsänderungen sind vernachlässigbar gering.

Kompensationsschreiber haben im allgemeinen — wie Tafel 34, S. 64, zeigt — elektronische Verstärker, doch gibt es auch die Kompensations-Linienschreiber KOMPENSOGRAPH 192×288 und 144×144 mit Magnetikverstärker. Man wird diese hauptsächlich verwenden, wenn „eingeprägte" Ströme vorliegen, wie z. B. beim TELEPERM-System.

Für besondere meßtechnische Aufgaben können in den KOMPENSOGRAPH Grenzkontakte und weitere Meßpotentiometer (zur Übertragung des Meßwertes auf andere Geräte) sowie Zeitmarkierwerke (zum Markieren des Zeitpunktes oder der Dauer eines Vorgangs) eingebaut werden.

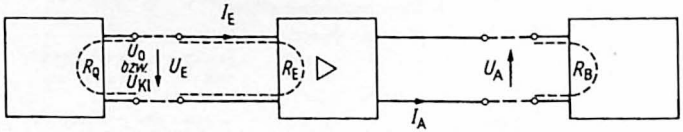
**Tafel 36** Eigenverbrauch und Meßbereichendwerte von Schreibern je Meßwerk

| Meßwerk | Meßgröße | Eigenverbrauch etwa | Anmerkungen |
|---|---|---|---|
| | | **1. Linienschreiber** | |
| | Gleichstrom<br>Gleichspannung | 10 bis 30 mW<br>$U_n \cdot 4$ mA | bei Meßbereichen $\geq 6$ V<br>Kleinste und größte Meßbereichendwerte:<br>250 µA, 10 A; 0,6 V, 1,5 kV |
| | Gleichstrom<br>Gleichspannung | $10^{-7}$ bis $10^{-9}$ W | Kleinste und größte Meßbereichendwerte:<br>Schwingkreisverstärker<br>25 µA, 600 µA; 6 mV, 600 mV<br>Lichtelektrische Verstärker<br>1,5 µA, 100 µA; 150 µV, 6 mV |
| | Wechselstrom<br>Wechselspannung | 30 bis 60 mW<br>1,5 bis 2 VA<br>$U_n \cdot 10$ mA | bei Meßbereichen $\leq 100$ mA<br>$\geq 150$ mA<br>$\geq 10$ V<br>Kleinste und größte Meßbereichendwerte:<br>4 mA, 25 A; 10 V, 600 V |
| | Wechselstrom<br>Wechselspannung | 3 bis 9 VA | Kleinste und größte Meßbereichendwerte:<br>.../1 A, .../5 A; 60 V, 600 V |

**Tafel 36** (Forts.) Eigenverbrauch und Meßbereichendwerte von Schreibern je Meßwerk

| Meßwerk | Meßgröße | Eigenverbrauch etwa | Anmerkungen |
|---|---|---|---|
| | | **1. Linienschreiber** (Forts.) | |
| | Leistung | Strompfad 6 VA; Spannungspfad bei 100 V 1,3 bis 3 VA | bei $\cos\varphi = 1$, bei $\cos\varphi = 0{,}5$ verdoppeln sich die Werte für den Spannungspfad. Kleinste und größte Meßbereichendwerte: .../1 A, .../5 A; .../100 V, .../500 V |
| | Leistungsfaktor | Strompfad; Spannungspfad bei 100 V 14 VA 10 bis 12 VA | bei $\cos\varphi = 1$ |
| | Frequenz | bei 100 V 13 VA | Kleinste und größte Meßbereichendwerte: 15/18 Hz, 49/51 Hz, 42/55 Hz |
| | Zeitabhängigkeit | 0,6 bis 0,9 W 1,7 W; 3,4 W | 2 bis 60 V 110 V; 220 V Ansprechzeit etwa 13 ms |
| | | **2. Punktschreiber** | |
| | Gleichstrom Gleichspannung | $6 \cdot 10^{-8}$ W | Kleinste und größte Meßbereichendwerte: 8 µA, 250 µA; 6 mV Punktfolge: 20 s (oder 10 s) |
| | Widerstand | $2 \times 8 \cdot 10^{-4}$ W | Kleinster und größter Meßstrom: ± 50 µA, ± 12 mA Punktfolge: 20 s (oder 10 s) |
| | | **3. KOMPENSOGRAPH** | |
| | Gleichstrom Gleichspannung | $10^{-14}$ W (Anschlußwert etwa 50 VA) | Linienschreiber-Einstellzeit: 0,4 bis 48 s Punktschreiber-Punktfolge: 2 bis 48 s Kleinste und größte Meßbereichendwerte: > 0,2 mA (indir.); 1 mV, 100 mV |
| | Gleichstrom Gleichspannung | $10^{-2}$ W | Linienschreiber-Einstellzeit: 4 bis 48 s Kleinste und größte Meßbereichendwerte: 2,5 mA, 50 mA; 500 mV (indir.) |

**Gleichstrom- und Gleichspannungs-Meßverstärker.** Man kann heute mit Linienschreibern Strom- und Spannungswerte aufzeichnen, die sich früher nur mit Galvanometern anzeigen ließen. Dazu wird vor den Linienschreiber meist ein Schwingkreisverstärker geschaltet (s. Bild 41).




$R_Q$ Quellenwiderstand
$U_0$ Leerlaufspannung
$U_{KI}$ Klemmenspannung
$U_E$ Eingangsspannung
$I_E$ Eingangsstrom
$R_E$ Eingangswiderstand (betriebsmäßig, daher auch oft als Betriebswiderstand bezeichnet)
$I_A$ Ausgangsstrom
$U_A$ Ausgangsspannung
$R_B$ Bürde (Schreiber-Eingangswiderstand)

Bild 41 Meßwertverstärkung, Grundschaltung

Moderne Schwingkreisverstärker sind mit Transistoren bestückt und deshalb in ihren Abmessungen so klein, daß sie in Steckbauweise ausgeführt (Bild 42) und meist im Schreibergehäuse untergebracht werden können. Sie haben als steuerndes Glied ein hochempfindliches Galvanometer (vgl. Bild 43), dessen bewegliches Organ ein zwischen die Kollektor- und die Emitterspule des HF-Generators ragendes Abschirmfähnchen dem Meßwert entsprechend einstellt. (Beim Meßwert 0 sind die Spulen völlig gegeneinander abgeschirmt.) Das Galvanometer ändert auf diese Weise die

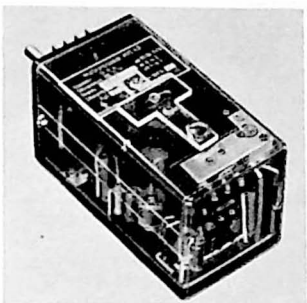


Bild 42
Schwingkreisverstärker in Steckbauweise

Rückkopplung und damit die Amplitude der HF-Schwingung im Kollektorkreis. Der HF-Strom wird über zwei Kondensatoren abgenommen und in einer Gleichrichterschaltung in den Ausgangsstrom $I_A$ umgeformt. Die Widerstandskombination hinter dem Gleichrichter dient zum Erzeugen eines Vorstroms, mit dem die Nullage bei Messungen mit wechselnder Energierichtung in die Mitte des Anzeigebereiches verlegt werden kann.

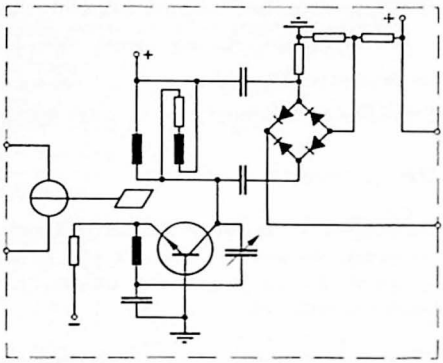


Bild 43
Schwingkreisverstärker, Grundschaltung

Zur *Stromverstärkung* muß der Eingangswiderstand des Verstärkers so niedrig sein, daß im Eingangskreis kein zusätzlicher Widerstand die Stärke des Stromes beeinflußt:

$$R_E \approx 0, \qquad U_E \approx 0.$$

Bei der *Spannungsverstärkung* muß demgegenüber der Eingangswiderstand des Verstärkers so hoch sein, daß kein das Meßergebnis beeinflussender Strom $I_E$ auftreten kann. Bei einer Belastung würde an Stelle der zu messenden Leerlaufspannung $U_0$ infolge des Spannungsabfalls am Quellenwiderstand $R_Q$ nur die Klemmenspannung $U_{Kl} = U_0 - R_Q I_E$ zur Verfügung stehen. Es muß sein:

$$I_E \approx 0 \text{ und } U_E \equiv U_{Kl} \approx U_0.$$

Die für beide Verstärkungsarten aufgestellten Forderungen sowie auch die nach linearer Verstärkung, einem konstanten Verstärkungsgrad (Unabhängigkeit z.B. von Netzspannungsschwankungen) und einem „eingeprägten" Ausgangsstrom (in bestimmten Grenzen vom Widerstand des Ausgangskreises unabhängig) lassen sich durch Gegenkopplung weitgehend erfüllen. Man unterscheidet Strom- und Spannungsgegenkopplung.

Die *Stromgegenkopplung* (Stromkompensation) ist in der „*Saugschaltung*" (Bild 44) für Stromverstärker verwirklicht, bei der im Idealfall der Eingangsstrom völlig abgesaugt wird. Die Differenz zwischen dem Ausgangsstrom $I_A$ und dem abgesaugten Strom $I_S$ ruft am Kompensationswiderstand $R_K$ einen Spannungsabfall $U_K = R_K (I_A - I_S)$ hervor. Ist die Bedingung

$$U_K = U_v, \qquad \text{also} \qquad R_K (I_A - I_S) = R_v I_S$$

erfüllt, so herrscht Gleichgewicht und es gilt

$$I_A = I_S (R_K + R_v)/R_K \quad \text{bzw.} \quad I_S = [R_K/(R_K + R_v)]\, I_A = k \cdot I_A .$$

Im erwähnten Idealfall $I_S = I_E$ ist $I_E = k \cdot I_A$.

Zwischen $a$ und $b$ liegt also keine Spannung:

$$U_E = 0 .$$

Das entspricht

$$R_E = 0 .$$

Tatsächlich ist der durch den Gegenkopplungsgrad (Maß für die Gegenkopplung) bestimmte Bruchteil von $I_E$ als „Stellstrom" am Verstärker wirksam; der Eingangswiderstand ist dem Gegenkopplungsgrad umgekehrt proportional.

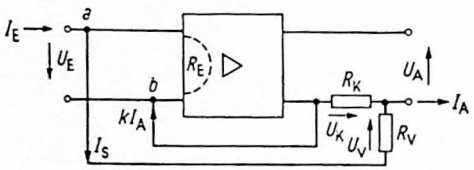



Bild 44
Saugschaltung, Grundschaltung für Stromverstärker

Die *Spannungsgegenkopplung* (Spannungskompensation) ist in der „Kompensationsschaltung" (Bild 45) für Spannungsverstärker verwirklicht. Eine dem Ausgangsstrom proportionale Spannung $U_K = R_K I_A$ wird der Eingangsspannung entgegengeschaltet. Im Idealfall müßte

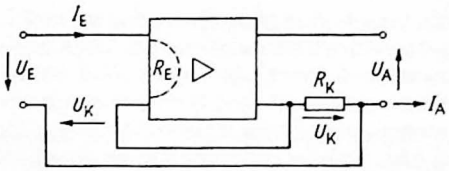
$$U_K = U_E = U_0 \text{ sein, d.h. } I_E = 0 .$$

Das entspricht

$$R_E = \infty .$$

Tatsächlich tritt als Eingangswiderstand der um den Gegenkopplungsgrad erhöhte Betriebswiderstand des Verstärkers in Erscheinung. An ihm liegt als „Stellspannung" der durch den Gegenkopplungsgrad bestimmte Bruchteil von $U_E$. Er muß lediglich den minimalen Strom zum Überwinden des Richtmoments der Stromzuführungsbändchen im Galvanometer aufbringen.

Bild 45
Kompensationsschaltung, Grundschaltung für Spannungsverstärker




**Tafel 37** Kenndaten von Schwingkreisverstärkern in Kompensationsschaltung

| Eingangsspannung f. Vollaussteuerung $U_E$ | Eingangswiderstand $R_E$ | Quellenwiderstand $R_Q$ | Ausgangsstrom f. Vollaussteuerung $I_A$ | Bürde $R_B$ | Gegenkopplungsgrad | Steuerleistung $U_E \cdot i_g$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| mV | kΩ | Ω | mA | Ω | | W |
| 6 | 30 | ≦ 20 | 2,5 (Ausführ. in Steckbauweise) oder 6 oder 10 (konvent. Bauweise) | 1000 oder < 7000 oder ≦ 2500 | 200/1 | $1{,}2 \cdot 10^{-9}$ |
| 10 | 60 | ≦ 50 | | | 200/1 | $1{,}7 \cdot 10^{-9}$ |
| 15 | 90 | ≦ 120 | | | 200/1 | $2{,}5 \cdot 10^{-9}$ |
| 25 | 180 | ≦ 300 | | | 300/1 | $3{,}5 \cdot 10^{-9}$ |
| 40 | 500 | ≦ 900 | | | 300/1 | $3{,}2 \cdot 10^{-9}$ |
| 60 | 600 | ≦ 1800 | | | 300/1 | $6 \cdot 10^{-9}$ |
| 100 | 750 | ≦ 3500 | | | 300/1 | $13 \cdot 10^{-9}$ |
| 150 | 1000 | ≦ 6000 | | | 300/1 | $23 \cdot 10^{-9}$ |
| 250 | 1500 | ≦ 11000 | | | 300/1 | $45 \cdot 10^{-9}$ |
| 400 | 2000 | ≦ 18000 | | | 300/1 | $80 \cdot 10^{-9}$ |
| 600 | 3000 | ≦ 27000 | | | 300/1 | $120 \cdot 10^{-9}$ |

**Tafel 38** Kenndaten von Schwingkreisverstärkern in Saugschaltung

| Eingangsstrom für Vollaussteuerung $I_E$ | Eingangswiderstand $R_E$ | Quellenwiderstand $R_Q$ | Ausgangsstrom für Vollaussteuerung $I_A$ | Bürde $R_B$ | Gegenkopplungsgrad | Steuerleistung $I_E \cdot u_g$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| µA | Ω | Ω | mA | Ω | | W |
| 25 | 4,0 | ≧ 3000 | 2,5 (Ausführ. in Steckbauweise) oder 6 oder 10 (konvent. Bauweise) | 1000 oder < 7000 oder ≦ 2500 | 200/1 | $2{,}5 \cdot 10^{-9}$ |
| 40 | 2,0 | ≧ 2000 | | | 200/1 | $3{,}2 \cdot 10^{-9}$ |
| 60 | 1,7 | ≧ 800 | | | 200/1 | $4{,}8 \cdot 10^{-9}$ |
| 100 | 0,4 | ≧ 200 | | | 200/1 | $4{,}0 \cdot 10^{-9}$ |
| 150 | 0,2 | ≧ 80 | | | 300/1 | $4{,}5 \cdot 10^{-9}$ |
| 250 | 0,1 | ≧ 35 | | | 300/1 | $6{,}25 \cdot 10^{-9}$ |
| 400 | 0,1 | ≧ 15 | | | 300/1 | $16 \cdot 10^{-9}$ |
| 600 | 0,1 | ≧ 12 | | | 300/1 | $36 \cdot 10^{-9}$ |

**Elektronischer Diagrammabtaster.** In vielen Fällen genügt es nicht, nur gelegentlich Einzelwerte am Schreiberdiagramm abzulesen oder bestimmte Abschnitte des Diagramms zu kontrollieren, sondern es muß für die Planung, Statistik und Betriebsführung eine fortlaufende Kurvenauswertung vorgenommen werden. Das war bisher sehr zeitraubend und kostspielig, und erst der selbsttätig arbeitende elektronische Diagrammabtaster ermöglicht es, in z. B. 25 Minuten einen Diagrammstreifen von 30 m Länge auszuwerten. Dabei ist es gleichgültig, ob die Schreibbreite 60, 100 oder 120 mm beträgt, ob die Schreibgeschwindigkeit 10, 20 oder 60 mm/h betragen hat und ob es sich um Kurven von Linienschreibern oder Punktschreibern handelt.

Beim Auswerten von Schreiberdiagrammen werden die Einzelwerte nach übergeordneten Begriffen zusammengefaßt (Datenreduzierung). Hauptsächlich interessieren:

1. Das Integral der Funktion, gewonnen durch Planimetrieren der Fläche unter dem Kurvenzug; z. B. elektrische Arbeit als Integral der Leistung.
2. Der Mittelwert über einen bestimmten Zeitabschnitt; z. B. Stundenmittelwert, gebildet aus dem Integral über den Zeitabschnitt dividiert durch die Anzahl der gezählten Stunden.
3. Die Häufigkeitsverteilung, gewonnen durch Messen der Häufigkeit des Auftretens bestimmter Amplituden.

Bild 46 zeigt die Grundschaltung des elektronischen Diagrammabtasters. Im *Abtastgerät* wird ein Ausschnitt des mit 20 mm/s ablaufenden Diagrammstreifens beleuchtet und auf eine Fernsehaufnahmeröhre projiziert. Ein Elektronenstrahl tastet das Bild des Diagramms in Ordinatenrichtung von 0,4 zu 0,4 mm ab. Die jeweilige Amplitude der Kurve wird in eine proportionale Impulszahl umgesetzt: ein Impulsgenerator, der Impulse konstanter Frequenz liefert, wird immer für die Zeit eingeschaltet, in der der Elektronenstrahl den Weg vom Bild der Nullinie bis zum Bild der Kurve durchläuft. Wenn die abzutastende Kurve kurz unterbrochen ist, wie z. B. zwangsweise die Aufzeichnung eines Punktschreibers, dann wird über einen Speicher der letzte richtige Wert so lange weiterhin für die Zählung abgegeben, bis die Kurve wieder einsetzt. Die Kurve erscheint also in der Zwischenzeit als parallel zur Zeitachse fortgesetzt.

Eine richtige Auswertung setzt voraus, daß sich die Farbe des Linien-
netzes von der der Kurve unterscheidet. Als zweckmäßige Kombinationen

erwiesen sich ein hellrotes Liniennetz, blaue Tintenschrift (min 0,3 mm breit) und ein vor das Objektiv gesetztes Rotfilter zum Ausblenden des Liniennetzes sowie ein hellgrünes Liniennetz, rote Tintenschrift und ein Grünfilter.

Den Integralwert der abgetasteten Kurve liefert das *Auswertegerät:* Ein elektromechanisches Zählwerk zählt alle Impulse und zeigt die Summe an. Die Anzahl der abgetasteten Stunden wird ebenfalls von einem elektromechanischen Zählwerk gemessen. Für die Häufigkeitsverteilung im Kurvenverlauf, für die sich insbesondere die Statistik interessiert, werden die Amplitudenwerte in Klassen eingeteilt. Nach jedem Abtastvorgang und nach der Entscheidung, in welche Klasse der Amplitudenwert gehört, erhält das entsprechende Zählwerk einen Impuls. Aus den angezeigten Impulszahlen der maximal zehn Klassenzählwerke kann die Häufigkeitsverteilungskurve gezeichnet werden.

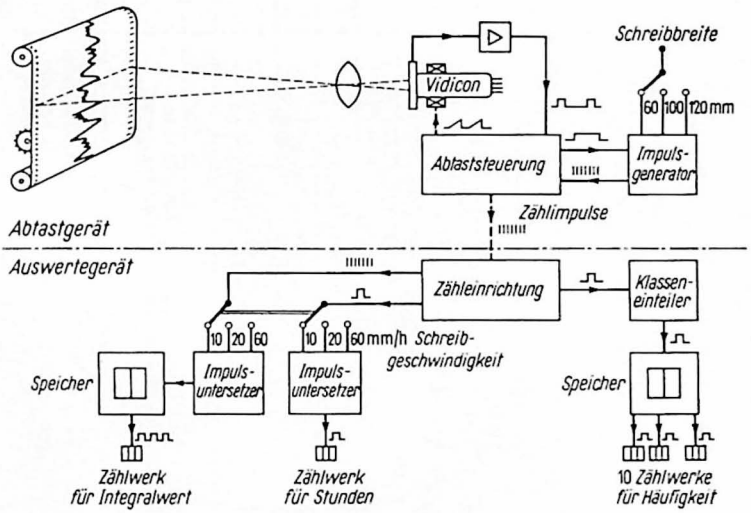
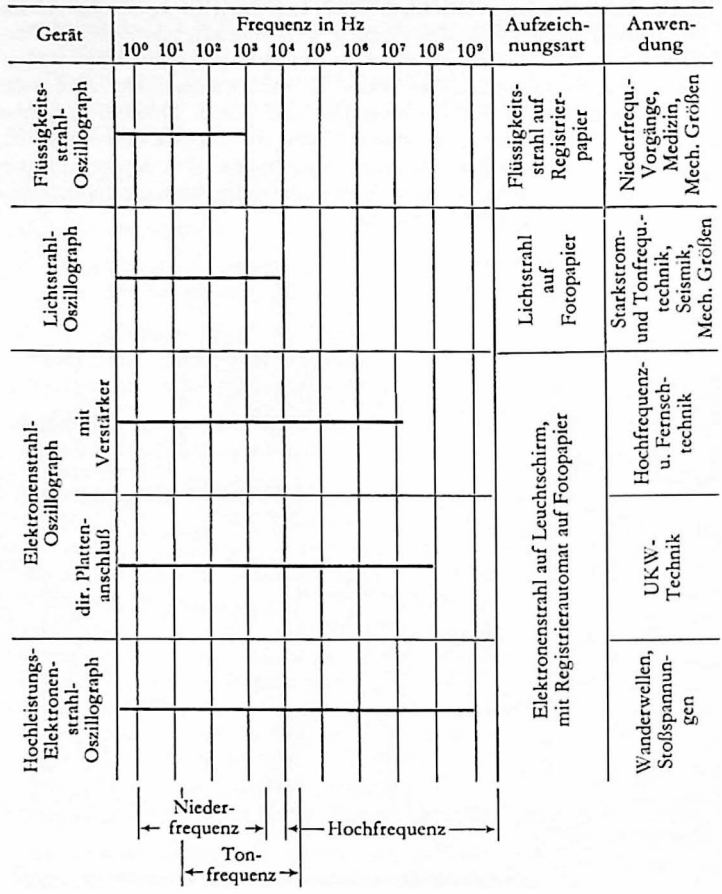



Bild 46 Grundschaltung des elektronischen Diagrammabtasters

## Ausführungen von Oszillographen

Man unterscheidet Flüssigkeitsstrahl-, Lichtstrahl- und Elektronenstrahl-Oszillographen. Tafel 39 gibt eine Übersicht über die Frequenzbereiche.

**Tafel 39** Frequenzbereiche der Oszillographen



**Flüssigkeitsstrahl-Oszillographen.** Das Meßwerk dieser unter dem Namen OSCILLOMINK bekannten Oszillographen ähnelt in seinem Aufbau einem Schleifenschwinger-Meßwerk (s. S. 37). Anstelle des Spiegels ist an der Schleife eine elastische Glaskapillare befestigt (Bild 47), deren freies Ende sich zu einer Düse von $^1/_{100}$ mm Öffnungsdurchmesser verjüngt. Wird von der elektrischen Vibratorpumpe die Schreibflüssigkeit durch das äußerst feine Filter in die Kapillare gedrückt, so erzeugt der haardünne Schreibstrahl auf dem gegenüber der Kapillare ablaufenden Diagrammpapier unmittelbar eine Schreibspur (Direktregistrierung). Geometrisch bedingte Abweichungen (max. Ausschlagswinkel $\pm 32°$), die mit dem Tangens des Winkels zunehmen, werden von der mit dem Kosinus des Winkels abnehmenden Stromempfindlichkeit der Schleife weitgehend eliminiert.

Den OSCILLOMINK gibt es in Standardausführung als Zwei-, Drei- oder Vierkanalgerät, d.h. mit zwei, drei oder vier Meßwerken; diese

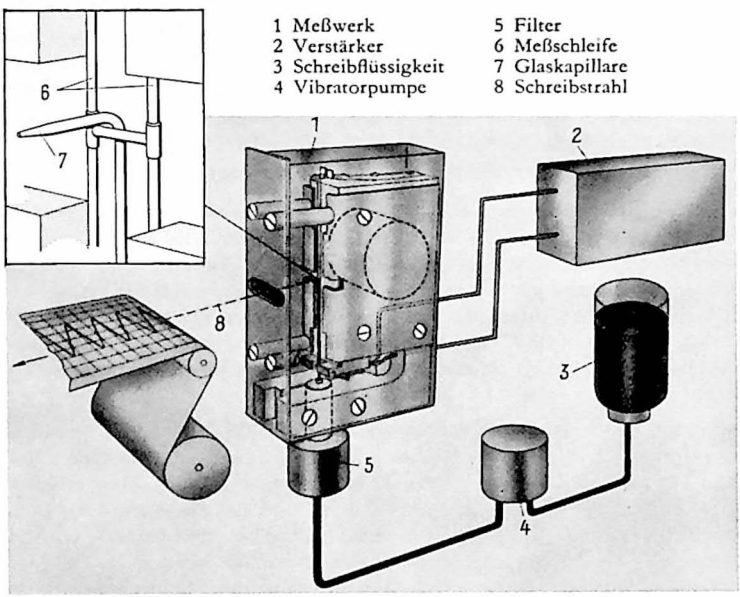



Bild 47 OSCILLOMINK, schematisch

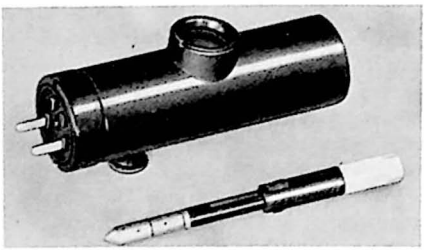
Geräte haben jeweils zwei eingebaute Verstärker. Die Ausführungen als Acht- und Zwölf-Kanalgerät enthalten dagegen keinen Verstärker. An alle Geräte können erforderlichenfalls außenliegende Verstärker angeschlossen werden. Auch kann man einzelne Meßwerke zum Schreiben von Zeitmarken benutzen. Die Papierbreite beträgt bei den Zwei-, Drei- und Vierkanalgeräten 100 mm, bei den Achtkanalgeräten 200 mm und bei den Zwölfkanalgeräten 300 mm. Der Papiervorschub kann während des Betriebes in Stufen eingestellt werden, und zwar bei den Geräten in Standardausführung zwischen 0,5 und 20 cm/s (über einen Zusatzantrieb bis 200 cm/s) und bei den größeren Geräten zwischen 0,2 und 200 cm/s. Um stets gut auswertbare Kurven zu erhalten, lassen sich die Strahlgeschwindigkeiten durch Ändern des Flüssigkeitsdruckes stetig einstellen und der Abstand zwischen Düse und Papier in den Stufen 20, 40 und 60 mm wählen.

Die Eigenfrequenz des trägheitsarmen Meßwerks beträgt etwa 650 Hz. Ein gleichmäßiger Verlauf des Frequenzganges über den erfaßbaren Bereich bis etwa 1000 Hz wird durch elektrische Kompensation erzwungen. Die Empfindlichkeit beträgt bei 40 mm Schreibabstand ohne Verstärker etwa 8 mm/100 mA und mit Verstärker etwa 10 mm/50 mV. Sie kann über Spannungsteiler bis auf 10 mm/250 V vermindert werden. Eingangsimpedanz ohne Verstärker 0,7 Ω und mit Verstärker 1 MΩ (asymmetrisch) oder 2 × 1 MΩ (symmetrisch).

**Lichtstrahl-Oszillographen.** Die obere Frequenzgrenze für eine Direktregistrierung liegt bei der Aufzeichnung mit einem Zeiger auf Wachs- oder Metallpapier bei 100 Hz und bei der mit Flüssigkeitsstrahl bei 1000 Hz. Mit einem Lichtzeiger, den man über optische Hilfsmittel auf lichtempfindliches Papier einwirken läßt, kann man aber noch Frequenzen bis über 10000 Hz registrieren. Meßwerke, die sich dafür eignen, sind die Spulen- und Schleifenschwinger-Meßwerke (s. S. 37) sowie die elektrodynamischen Schleifenschwinger-Meßwerke (s. S. 41).

*Schwinger* werden als zylinderförmige Organe (Bild 48) zum Einsetzen in Lichtstrahl-Oszillographen hergestellt. Während der Spulenschwinger herkömmlicher Ausführung in die Polschuhbohrung eines Magnetblocks (Bild 49) im Oszillographen gesteckt wird und das Magnetfeld im Luftspalt in Richtung des Lichtstrahls verläuft, sind bei einer besonderen Ausführung des Spulenschwingers und beim Schleifenschwinger der erforderliche Dauermagnet sowie beim elektrodynamischen Schleifenschwinger der Elektromagnet in das Schwingergehäuse mit eingebaut, und zwar so,

Bild 48
Spulenschwinger herkömmlicher Ausführung (unten) und Schleifenschwinger (oben)



daß das Feld im Luftspalt quer zur Lichtzeigerrichtung verläuft (vgl. Bild 7, S. 38). Allein dadurch sind die beiden verschiedenen Schwingerdurchmesser bestimmt. — Meistens gehört im Magnetblock ein Magnetsystem zu zwei Spulenschwingern.

Die Eigenschaften von Schwingern werden in dynamischer Hinsicht von der Eigenfrequenz und dem Dämpfungsgrad bestimmt, in statischer hingegen von der Stromempfindlichkeit und dem Innenwiderstand. Die Daten der Schwinger sind in den Tafeln 40 bis 42 zusammengestellt. (Während die jeweilige Angabe der Eigenfrequenz auf das ungedämpfte Meßwerk bezogen wird, beziehen sich die Angaben für die Stromempfindlichkeit und die Stromkonstante auf gedämpfte Schwinger.)

Die besonders geringe Trägheit des beweglichen Organs eines Schwingers drückt sich in der hohen Eigenfrequenz aus. Je höher die Eigenfrequenz ist, um so wahrer ist die Kurvendarstellung. Zu beachten ist allerdings,

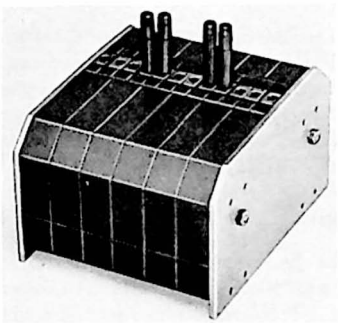


Bild 49
Vier Spulenschwinger in einem Magnetblock für 12 Schwinger

daß die Stromempfindlichkeit mit dem Quadrat der Eigenfrequenz abnimmt. — Um entstellende Eigenbewegungen zu unterdrücken, ist eine Dämpfung erforderlich. Von Natur aus ist, wie bei jedem Galvanometer, eine elektrodynamische Dämpfung wirksam, die mit von der Windungszahl abhängt, und zwar in quadratischer Beziehung. Beim Spulenschwinger reicht sie für niedrige Frequenzen aus, wenn der Meßschaltungswiderstand entsprechend bemessen ist (s. S. 126), beim Schleifenschwinger, der lediglich eine Windung hat, tritt sie nicht in Erscheinung. Im allgemeinen werden Schwinger deshalb mit Hilfe einer in das Schwingergehäuse eingefüllten Flüssigkeit von ganz besonderen Eigenschaften gedämpft. Die ausnutzbare Eigenfrequenz beträgt dann nur etwa 30 bis 45% der für „in Luft" angegebenen (bei einem Abfall der Amplitude bis auf 70% des statischen Ausschlags). Der Dämpfungsgrad beträgt bei 20 °C etwa 0,7 (70% der kritischen Dämpfung); hierbei sind die Wiedergabefehler beim Oszillographen stetiger und unstetiger Meßvorgänge am kleinsten. — Zum Aufzeichnen von Wirkleistungen verwendet man elektrodynamische Schleifenschwinger mit so niedriger Eigenfrequenz, daß sie die mit doppelter Netzfrequenz verlaufenden Leistungspulsationen nur als Welligkeit der Wirkleistungskurven wiedergeben. Ihre beweglichen Organe müssen zu träge sein, den Augenblickswerten zu folgen. Die Leistungsempfindlichkeit der elektrodynamischen Schleifenschwinger erhält man durch Dividieren der Stromempfindlichkeit durch den Widerstand des Spannungspfades und die Leistungskonstante durch Multiplizieren der Stromkonstante mit dem Widerstand des Spannungspfades. (Mit Hilfe von Hallgeneratoren kann man auch Leistungen mit den normalen Schleifenschwingern aufzeichnen. Leistungssummen lassen sich dabei durch elektrisches Addieren von Hallspannungen, s. S. 25, bilden.)

Der Meßstrom, der bei Schleifenschwingern den Lichtzeiger über die Papierbreite auslenkt, liegt zwischen einigen μA und 200 mA, die Meßspannung, die direkt angelegt werden darf, zwischen 30 und 100 mV. Wie allgemein bei Drehspulmeßwerken, lassen sich die Bereiche mit Neben- oder Vorwiderständen (s. S. 114) erweitern. Für Lichtstrahl-Oszillographen sind diese in „Universalstellern" für *Meßbereicherweiterungen* bis 10 A und 500 V zusammengebaut. Ihre Grobeinstellwiderstände sind logarithmisch gestuft; die Feineinstellung überlappt jeweils die Grobstufen.

Ist der Innenwiderstand $R_i$ der Meßspannungsquelle nicht vernachlässigbar, so kann es zur Entnahme einer ausreichenden Meßleistung nötig sein, die *Schaltung anzupassen*. Die günstigsten Verhältnisse ergeben sich, wenn

**Tafel 40** Daten der Spulenschwinger

| Eigenfrequenz in Luft | Schwingerwiderstand | Abschlußwiderstand [1] | max. zul. Belastung | Stromempfindlichkeit | Stromkonstante |
|---|---|---|---|---|---|
| Hz | Ω | Ω | mA | mm/mA m | mA m/mm |
| 120 | 40 | 190 | 10 | $6{,}6 \cdot 10^3$ | $0{,}15 \cdot 10^{-3}$ |
| 120 [2] | 220 | 800 | 2 | $12{,}0 \cdot 10^3$ | $0{,}08 \cdot 10^{-3}$ |
| 250 | 40 | 60 | 15 | $1{,}3 \cdot 10^3$ | $0{,}75 \cdot 10^{-3}$ |
| 250 [2] | 220 | 200 | 4 | $2{,}6 \cdot 10^3$ | $0{,}38 \cdot 10^{-3}$ |
| 350 | 40 | 25 | 14 | $0{,}7 \cdot 10^3$ | $1{,}45 \cdot 10^{-3}$ |
| > 750 | 40 | > 100 | 20 | 50 | 0,02 |
| > 2000 | 40 | > 15 | 60 | 7,6 | 0,13 |
| > 5000 | 27 | beliebig | 50 | 2,2 | 0,45 |
| > 10000 | 48 | beliebig | 40 | 1,3 | 0,77 |

[1]) Meßschaltungswiderstand für günstigsten Dämpfunsggrad 0,7.
[2]) Schwinger mit höherer Empfindlichkeit.

**Tafel 41** Daten der Schleifenschwinger

| Eigenfrequenz in Luft | Schwingerwiderstand | Abschlußwiderstand | max. zul. Belastung [1]) | Stromempfindlichkeit | Stromkonstante |
|---|---|---|---|---|---|
| Hz | Ω | Ω | mA | mm/mA m | mA m/mm |
| 700 | 1,4 | beliebig | 100 | 1,8 | 0,55 |
| 1300 | 9,5 | | 3 | 60 | 0,017 |
| 2500 | 4,8 | | 10 | 18 | 0,055 |
| 3500 | 2,7 | | 20 | 6,0 | 0,17 |
| 5000 | 1,9 | | 50 | 2,3 | 0,43 |
| 10000 | 0,9 | | 180 | 0,32 | 3,1 |
| 17000 | 0,5 | | 200 | 0,06 | 17 |

[1]) Gleichstrom oder Effektivwert bei sinusförmigem Wechselstrom.

**Tafel 42** Daten der elektrodynamischen Schleifenschwinger

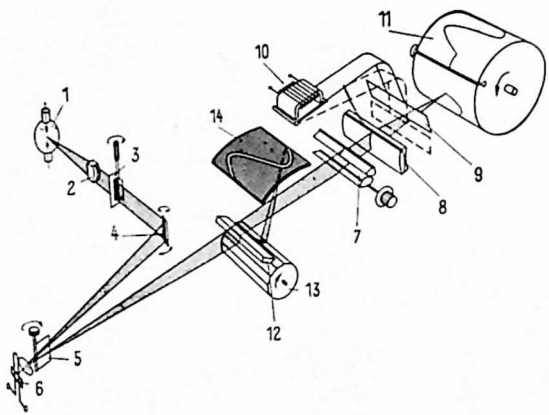
| Schleife ($U$) | | | Feldspule ($I$) | | | Stromempfindlichkeit | Stromkonstante |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Eigenfrequenz in Luft | Widerstand | max. zul. Belastg. [1]) | Wirkwiderstand | Induktivität | max. zul. Belastg. | | |
| Hz | Ω | mA | Ω | μH | A | mm/(mA)² m | (mA)² m/mm |
| 25 | 4,8 | 80 | 0,05 | 40 | 5 | 400 | 0,0025 |
| 25 | 4,8 | 80 | 19 | 20000 | 0,25 | 8000 | 0,00012 |
| 500 | 2,2 | 150 | 0,05 | 40 | 5 | 180 | 0,0055 |
| 2500 | 4,8 | 80 | 0,05 | 40 | 5 | 520 | 0,0019 |
| 2500 | 4,8 | 80 | 19 | 20000 | 0,25 | 11000 | 0,00009 |

[1]) Gleichstrom oder Effektivwert bei sinusförmigem Wechselstrom.

der Widerstand der Schaltung gleich $R_i$ ist. Für das Übersetzungsverhältnis eines Übertragers zum Anpassen eines niederohmigen Schwingers mit dem Widerstand $R_s$ an eine hochohmige Spannungsquelle, z. B. einen Meßwertgeber zum Erfassen mechanischer Größen, gilt: $\ddot{u} = \sqrt{\frac{R_i}{R_s}}$. Konstante und sehr langsam veränderliche Werte werden allerdings nicht übertragen, und es ist wegen der Frequenzabhängigkeit des Übertragungswiderstandes kein geradliniger Verlauf des Spannungsverhältnisses $\frac{u_2}{u_1}$ zu erwarten.

Kleine Auslenkungen des beweglichen Organs eines Schwingers führen im Oszillographen durch Reflexion des Lichtstrahls zum Wandern eines Lichtpunktes auf dem ablaufenden lichtempfindlichen Papier (Bild 50). Ordnet man mehrere Schwinger nebeneinander an — je nach Bauart des Oszillographen und nach Art der Schwinger bis zu 24 (vergl. Tafel 44, S. 92) — dann können auch zahlreiche Vorgänge gleichzeitig auf demselben Papierstreifen aufgezeichnet werden.

Als maximale *Schreibgeschwindigkeit* (nicht Papiergeschwindigkeit) bezeichnet man analog dem Begriff in der Elektronenstrahl-Oszillographie die noch auswertbare Geschwindigkeit des Lichtflecks. Diese ist durch die




1 Lampe
2 Kondensor
3 Spaltblende
4 Einstellspiegel
5 Drehblende
6 Schwinger
7 Schlitzblende
8 Zylinderobjektiv
9 Verschlußblende
10 Verschlußmagnet
11 Fotopapier
12 Linsenprisma
13 Polygonspiegel
14 Mattscheibe

Bild 50 Strahlengang im Lichtstrahl-Oszillographen OSCILLOGRAND

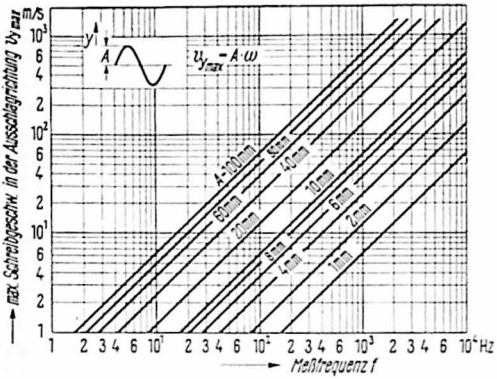



Bild 51 Maximale Schreibgeschwindigkeit von Lichtstrahl-Oszillographen bei Sinusform

Eigenfrequenz der Schwinger gegeben und liegt bei etwa 25 km/s. Die bei neuzeitlichen Oszillographen erreichte Beleuchtungsstärke im Lichtfleck genügt, um bei dieser Lichtfleckgeschwindigkeit das Papier ausreichend zu schwärzen. Den Zusammenhang zwischen Amplitude, Frequenz und maximaler Schreibgeschwindigkeit bei Sinusform (Nulldurchgang) zeigt Bild 51.

Der *Papiervorschub*, der beim Lichtstrahl-Oszillographen die zeitliche Auflösung der Aufzeichnung hervorruft, wird abhängig von der Frequenz des Vorganges und von der erwünschten Auflösung, bei periodischen Vorgängen von der Periodenlänge, gewählt (Bild 52). Für den Papiertransport haben sich die in Tafel 43 zusammengestellten drei Arten durchgesetzt, von denen die erste und dritte beim OSCILLOGRAND (Bild 50), die zweite und dritte vom OSCILLOPORT (Bild 53, S. 90) und beim Lichtstrahl-OSCILLOMAT (Bild 54, S. 91) und die dritte beim OSCILLOFIL (Bild 55, S. 92) angewendet werden.

Zeitmarken, die von einem Schwinger mit auf das Oszillogramm gezeichnet werden (s. Rückseite des Schutzumschlags), dienen zur genauen Kalibrierung der Abszisse. Die Impulse dazu, und zwar meist solche von 1000 Hz, von denen jeder zehnte mit 100 Hz überlagert ist, liefert ein Frequenzgenerator. Oszillogramme, die auf fortlaufenden Streifen aufgenommen werden, erhalten eine entsprechende Numerierung aufbelichtet

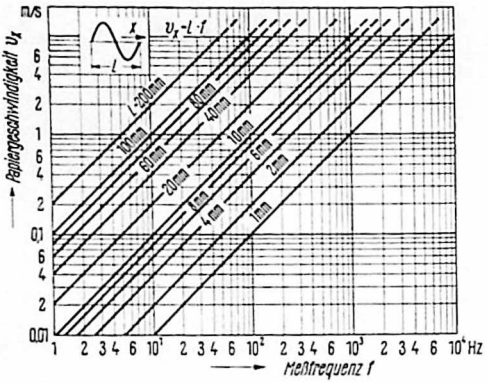



Bild 52 Zeitauflösung in Lichtstrahl-Oszillographen bei Sinusform

und jeweils am Ende eine Markierung eingestanzt (Bild 53), um sie in der Dunkelkammer trennen zu können.

Lampen der erforderlichen Leuchtdichte stehen heute als Speziallampen (z. B. 15 V, 60 W), die nötigenfalls während der Aufnahme kurze Zeit überbelastet werden, und als Quecksilberdampf-Höchstdrucklampen (HBO; für Schreibgeschwindigkeiten über 100 m/s) zur Verfügung. Die HBO ist eine Entladungslampe, in der ein Lichtbogen großer Leistung auf kleinem Raum zusammengedrängt ist.

Zahlreiche Steuer- und Schalteinrichtungen zur Verfeinerung der Aufnahmetechnik vervollständigen den neuzeitlichen Oszillographen. Sie ermöglichen z. B. *gesteuerte Aufnahmen*, bei denen der Vorgang ausgelöst wird, wenn der Oszillograph aufnahmebereit ist, und *gezielte Aufnahmen*, bei denen der Oszillograph anläuft, wenn ein unwillkürlich ablaufender Vorgang beginnt.

Die Notwendigkeit, das belichtete Papier nachträglich zu entwickeln, hat dazu geführt, auch *automatische Entwicklungseinrichtungen* (s. Bild 54, Bild 62, S. 103, und Bild 63, S. 104) zu bauen, die die Entwicklungszeit verkürzen und die Oszillographie von der Dunkelkammer unabhängig machen. Die Durchlaufgeschwindigkeiten sind zwischen 0,1 und 0,6 cm/s einstellbar.

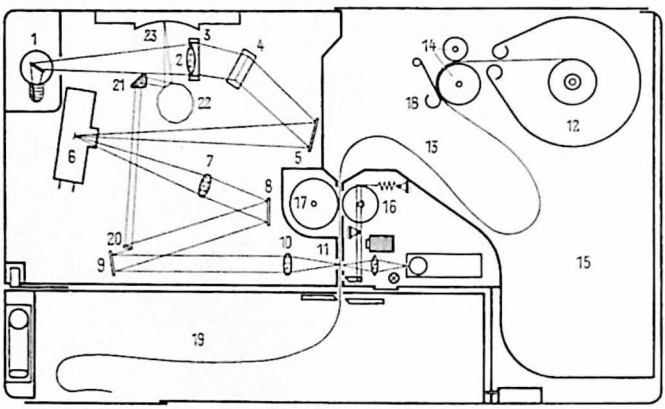
Neuerdings gewinnt auch die *UV-Direktschrift* (vgl. Bild 55, S. 92) an Bedeutung: Mit einer an Ultraviolettstrahlung reichen Lichtquelle wird auf entsprechend sensibilisiertem Papier bei Schreibgeschwindigkeiten bis zu etwa 2500 m/s eine ausreichende Schwärzung erzeugt, und zwar direkt,

d. h. ohne zusätzliche Entwicklung. Diese Oszillogramme sind zwar weniger kontrastreich und weniger lange haltbar als die durch einen Entwicklungsvorgang gewonnenen, dafür jedoch sofort auswertbar.

**Tafel 43** Arten des Papiertransportes bei Lichtstrahl-Oszillographen

| Prinzip | Eigenart | Papiergeschw. kleinste | größte | Oszillogrammlänge | Papierbreite |
|---|---|---|---|---|---|
| | | cm/s | | cm | cm |
| *Trommel* Papier auf Umfang einer umlaufenden Trommel (s Bild 50, S. 86). Verschluß wird bei Durchlauf des Papieranfangs oder einer gewünschten anderen Stelle des Trommelumfangs geöffnet und beliebig, jedoch vor Papierende, geschlossen. | Bereits bei Aufnahmebeginn volle Papiergeschwindigkeit. Mehrmalige Aufnahme auf gleichem Streifen übereinander und in Segmenten möglich. Papierstreifen müssen einzeln in Dunkelkammer ausgewechselt werden | 3,1 | 1000 | 20<br>40<br>60 | 12 |
| *Vorgabe* Papier wird aus Vorratskassette von Hand oder automatisch in gewünschter Länge lose liegend bereitgestellt und bei Aufnahmestart, von Gummiwalzen erfaßt, am Verschluß „vorbeigeschossen" und in einer Einlaufkassette gesammelt (s. Bild 53). | Zahlreiche, auch automatisch auszulösende Aufnahmen hintereinander möglich. Kürzeste Anlaufzeit bis zur vollen Papiergeschwindigkeit. | 0,1 | 1500<br>(300 beim Ziehen) | 10 bis 200 (bis 3500 beim Ziehen) | 10, 12 oder 20 |
| *Ablauf* Papier wird aus Vorratskassette am Verschluß vorbei in Einlaufkassette gefördert. | Große Aufnahmelängen möglich. Kurze Anlaufzeit bis zur vollen Papiergeschwindigkeit. | 0,8 | 250 | 10 bis 3000 | 10, 12, 20 oder 60 |

Zur *visuellen Beobachtung* der Aufzeichnung kann ein Teil des vom Schwingerspiegel reflektierten Lichts auf einen umlaufenden Polygonspiegel abgezweigt werden, der die zeitliche Auflösung unter Ausnutzung der Trägheit des menschlichen Auges bewirkt (vgl. Bild 50, S. 86 und Bild 53). Nur bei sehr langsamen Vorgängen ist diese zu gering, das Bild eines zusammenhängenden Kurvenzuges entstehen zu lassen. Um bei periodischen Vorgängen stehende Kurven auf der Mattscheibe einstellen zu können, muß die Drehzahl des Polygonspiegelmotors stetig einstellbar und für Wechselstromvorgänge mit dem Netz zu synchronisieren sein. Man verwendet daher Motoren mit Gleichstrom- und Drehstromteil oder einen Gleichstrom- und einen Synchronmotor.




1 Lampe
2 Kondensorlinse
3 Spalt
4 Umlenkspiegel
5 Umlenkspiegel
6 Schleifenschwingerspiegel
7 Zwischenlinse
8 Spiegel
9 Spiegel
10 Zylinderlinse
11 Verschluß
12 Vorratskassette
13 Registrierpapier
14 Einkurbelwalzen
15 Wanne
16 Andrückwalze
17 Transportwalze
18 Schwinge zum Abschalten des Andrückmagnets für die Andrückwalze
19 Einlaufkassette
20 Ausblendspiegel
21 Linsenprisma
22 Polygonspiegel
23 Mattscheibe



Bild 53 Grundsätzlicher Aufbau des Lichtstrahl-Oszillographen OSCILLOPORT

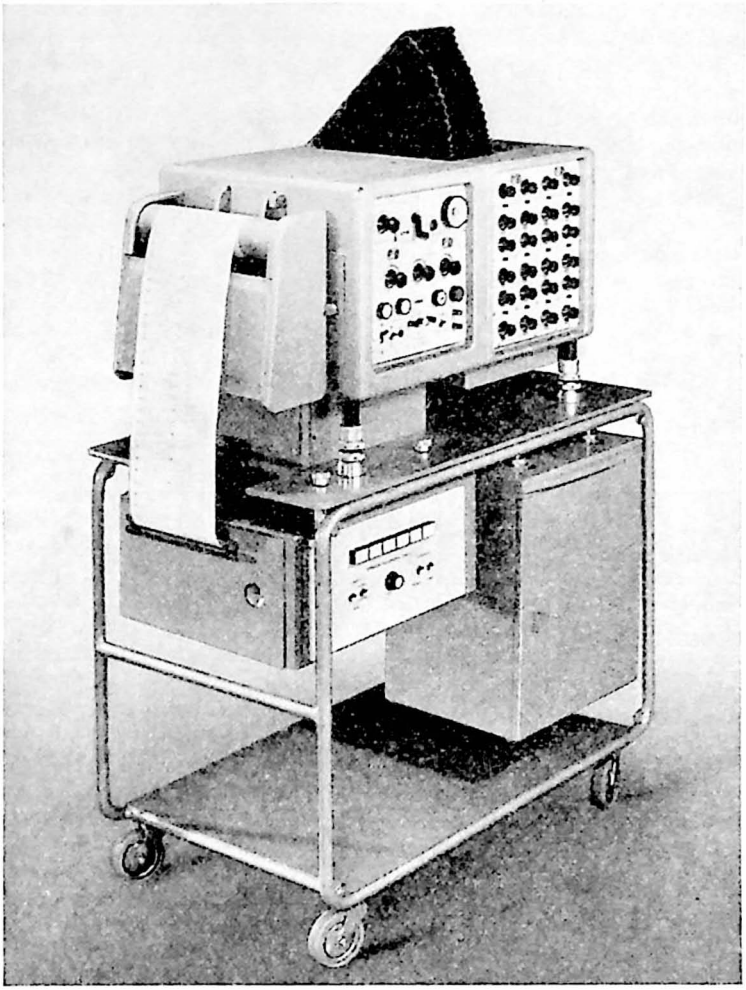


Bild 54 Lichtstrahl-OSCILLOMAT
mit Direkt-Entwicklungs-Automat und Aufspulvorrichtung

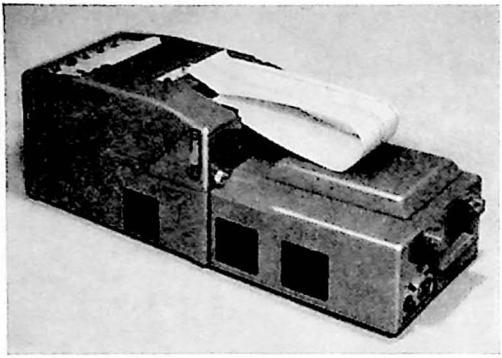


Bild 55 Lichtstrahl-Oszillograph OSCILLOFIL 16 mit UV-Zusatz

**Tafel 44** Siemens-Lichtstrahl-Oszillographen

| | Nullinien-spiegel | Spulen-schwinger [1]) | Schleifen-schwinger [1]) | Lichtzeiger-länge |
|---|---|---|---|---|
| OSCILLOGRAND (s. Bild 50, S. 86). Großer Oszillograph hoher Meßempfindlichkeit | 6 | | 12 (3 el.-dyn.) | 80 cm |
| OSCILLOPORT (s. Bild 53). Leicht zu transportieren; für 24-V-Batteriebetrieb | 1 | | 5 (1 el.-dyn.) | 50 cm |
| | | 10 | | |
| | | 6 | 2 | |
| Lichtstrahl-OSCILLOMAT (s. Bild 54). Weitgehend automatischer Ablauf d. Aufnahmevorgangs; verwendbar mit UV-Spezialpapier und/oder Registrierpapier für Naßentwicklung | 2 | | 8 (4 el.-dyn.) | 50 cm |
| | | 6 | 5 | |
| | | 12 | 2 | |
| | 3 | | 12 (4 el.-dyn.) | 50 cm |
| | | 6 | 9 | |
| | | 12 | 6 | |
| | | 18 | 3 | |
| | | 24 | | |
| OSCILLOFIL 6, OSCILLOFIL 16 (s. Bild 55). Kleine Spulenschwinger-Oszillographen. OSCILLOFIL 16 verwendbar mit UV-Spezialpapier und/oder Registr.-Papier für Naßentwickl. | 1 | 6 | | 30 cm |
| | max. 8 | 16 | | 30 cm |

[1]) Vgl. Bild 48, S. 83. Anzahlmäßig können jeweils anstelle der Schleifenschwinger auch Spulenschwinger im großen Gehäuse (s. S. 82) verwendet werden.

**Elektronenstrahl-Oszillographen.** Aufgabe der Elektronenstrahl-Oszillographie ist es, elektrische Vorgänge sichtbar zu machen, die von Lichtstrahl-Oszillographen nicht mehr erfaßt werden können. Die mechanischen Eigenschaften der Schwinger-Meßwerke setzen nämlich bestimmte Grenzen. In den Meßwerken der Elektronenstrahl-Oszillographen, den Elektronenstrahlröhren (s. S. 44), wird aber ein von der Kathode ausgehender Elektronenstrahl trägheitslos gesteuert, so daß noch Vorgänge mit einer Frequenz von etwa 100 MHz der Untersuchung zugänglich gemacht werden können.

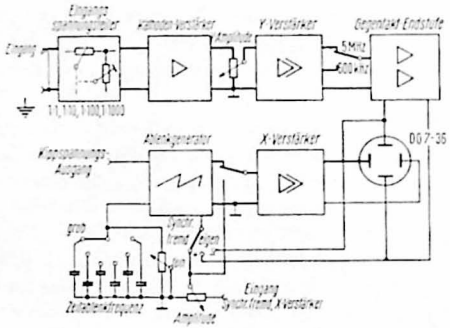
Weil der auf dem Bildschirm beobachtbare Bildablauf oftmals nicht fotographisch festgehalten wird, ist anstelle von „Oszillograph" auch die Bezeichnung „Oscilloscop" üblich. Die Nachleuchtdauer des Leuchtschirmes (s. S. 44) ist durch die Abklingzeit der Leuchtdichte auf 1% des Anfangswertes charakterisiert. Sie beträgt bei den in Deutschland gebräuchlichen Röhren 2 µs, 8 ms, 12 ms, 50 ms, 500 ms oder 12 s.

Weil das *Y*-Ablenksystem der Elektronenstrahlröhre eine relativ hohe Aussteuerungsspannung benötigt, haben Elektronenstrahl-Oszillographen im allgemeinen zur Erzeugung der dem Meßvorgang entsprechenden Strahlablenkung in Richtung der *y*-Achse einen *Y-Verstärker* (vgl. Bild 56). Von diesem wird eine hohe Wiedergabetreue (Linearität der Aussteuerung) gefordert: Nicht nur der Mittelwert der Meßspannung, sondern alle Einzelheiten der Kurvenform, also auch die höchsten darin enthaltenen Oberschwingungen, sollen wiedergegeben werden. Die Bandbreite des *Y*-Verstärkers ist demnach ein wesentliches Merkmal eines Elektronenstrahl-Oszillographen. Sie wird durch die obere und untere Frequenzgrenze bestimmt, bei denen die Verstärkung um 3 dB, d.h. um 30%, abfällt. Wenn der Oszillograph sehr vielseitigen Zwecken dienen soll, kann der *Y*-Verstärker auch für zwei verschiedene Bandbreiten umschaltbar sein.

Die *x*-Achse des Oszillogramms wird in den weitaus meisten Fällen zeitproportional geschrieben. Die dafür am *X*-Ablenksystem benötigte Ablenkspannung (Kippspannung) erzeugt ein *Ablenkgenerator* (Miller-Integrator, Phantastron, Sanatron). Sie muß einen möglichst exakten zeitproportionalen Amplitudenanstieg haben (Linearität der Ablenkung) und, um Oszillogramme in regelmäßiger Wiederkehr schreiben zu können, nach erreichter Maximalamplitude auf Null (meist am linken Schirmrand) zurückspringen. Die Kurve der Ablenkspannung ist daher dreieckförmig, so daß man auch von einer Sägezahnspannung spricht. Damit die Spur des Rücklaufs nicht die Übersichtlichkeit des Oszillogramms stört, wird der

Strahl während der Rücklaufzeit durch eine Sperrspannung am Wehneltzylinder dunkelgesteuert (Zeitmarkierungen können durch Hellsteuerung mittels Impulsen eingeblendet werden). Die Ablenkspannung ist an einem Schalter in weiten Grenzen einstellbar: Das Oszillogramm kann in Richtung der $x$-Achse Zeiten zwischen etwa 1 min und 1 µs entsprechen. — Die vom Ablenkgenerator erzeugte Spannung reicht in vielen Fällen nicht zur Aussteuerung des $X$-Ablenksystems im Elektronenstrahlrohr aus. Es wird daher ein *X-Verstärker* zwischengeschaltet, der meist auch durch Anschlüsse auf der Frontplatte des Oszillographen zugänglich ist, damit unter Abschaltung des Ablenkgenerators das $X$-Ablenksystem im Bedarfsfall durch eine Fremdspannung ausgesteuert werden kann.

Eine *Synchronisiereinrichtung* dient dazu, periodisch wiederkehrende Meßvorgänge mit der Ablenkspannung in Gleichlauf zu bringen, damit am Leuchtschirm ein stehendes Bild erscheint. Dazu muß die Wiederholungsperiode der Ablenkspannung in einem ganzzahligen Verhältnis zur Periode des Meßvorganges stehen. Das erreicht man dadurch, daß man vom Meßvorgang, meist aus einer Endstufe des $Y$-Verstärkers, eine Teilspannung auf den Ablenkgenerator gibt, die bei steilen Flanken des Meßvorganges einen Impuls für den Einsatz der Ablenkspannung auslöst (Eigensynchronisierung oder interne Synchronisierung). Man kann, wenn eine entsprechende Klemme am Oszillographen vorgesehen ist, dem Ablenkgenerator auch eine äußere Spannung zur Auslösung zuführen (Fremdsynchronisierung oder externe Synchronisierung). — Da das Einsetzen des Ablenkgenerators also von einem Spannungsimpuls veranlaßt wird,




94 Bild 56 Elektronenstrahl-Oszillograph OSCILLARZET 15, Grundschaltung

ist die Wirksamkeit der Synchronisierung davon abhängig, ob der zugeführte Impuls positiv oder negativ verläuft. Die Synchronisiereinrichtung des Oszillographen läßt sich daher meist wahlweise auf Synchronisieren mit positiven oder negativen Impulsen einstellen. — Bei einmaligen und bei in unregelmäßiger Folge wiederkehrenden Meßvorgängen wird der Einsatz der Ablenkspannung von der Anstiegsflanke der Meßspannung oder von einem dem aufzuzeichnenden Meßvorgang vorangehenden Impuls ausgelöst (meist als Impulsauslösung oder, nach amerikanischer Ausdrucksweise, als Triggerauslösung bezeichnet), so daß die Oszillogramme der Vorgänge stets am gleichen Punkt einsetzen und dadurch direkt vergleichbar werden.

Um einzelne Teile des Oszillogramms deutlicher erkennbar zu machen, sind größere Oszillographen mit einer *Dehnungseinrichtung* ausgestattet: Die gesamte Ablenkspannung oder ein Teil von ihr wird erhöht und das Oszillogramm dadurch um ein Vielfaches des Schirmdurchmessers gedehnt. Der interessierende Teil des Oszillogramms kann durch eine „$X$-Punktlage-Verschiebung" in das Blickfeld des Schirmes gerückt werden (s. Bild 57). — Oft wird auch eine Dehnung der $y$-Achse des Oszillogramms angewendet. — Darüber hinaus bieten Spitzenoszillographen (z. B. OSCILLAR I/040) eine bis zu 10000fache Auflösung jedes beliebigen Teilausschnitts, und zwar durch die Verwendung von zwei eingebauten Kippgeneratoren.

Zwei Eigenschaften von Elektronenstrahl-Oszillographen sind von besonderer Bedeutung: Die Empfindlichkeit und die Strahlbeschleunigung, von der die erreichbare Schreibgeschwindigkeit abhängt.

Um eine Vergleichsgröße für die *Empfindlichkeit der Elektronenstrahlröhren* zu gewinnen, definiert man als Ablenkkoeffizienten die Strecke, um die der

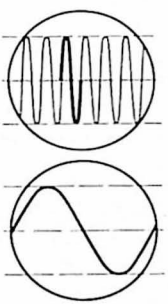


Bild 57 Ungedehntes und gedehntes Oszillogramm

Strahlpunkt auf dem Schirm durch eine an ein Plattenpaar angelegte Spannung von 1 V verschoben wird. Man gibt sie in V/mm an.

Entsprechend ist der *Ablenkkoeffizient eines Oszillographen* einschließlich Verstärker durch die Strecke definiert, um die der Strahlpunkt auf dem Schirm durch eine an die Eingangsklemmen des Oszillographen angelegte Spannung von 1 V bzw. 1 mV verschoben wird (V/cm; mV/cm). — Sollen Spannungen, die größer als die zulässige Eingangsspannung des Verstärkers sind, oszillographiert werden, so wendet man *Eingangsspannungsteiler* an. Sie setzen den Ablenkkoeffizienten in einem bestimmten Verhältnis herab. Eingangsspannungsteiler sollen innerhalb der Bandbreite des Oszillographen frequenzunabhängig sein.

Größere Oszillographen, z.B. OSCILLAR I und OSCILLAR II, haben einen *Rechteckgenerator*, dessen einstell- und ablesbare Spannung an den Oszillographen-Eingang gelegt werden kann. Es wird dadurch ermöglicht, ein vor dem Leuchtschirm angebrachtes Raster, das vielfach durch seitlich eingestrahltes Licht aufhellbar ist, zu kalibrieren und dann die Amplitude des Meßvorgangs zu bestimmen. Zweckmäßigerweise wird man den Ablenkkoeffizienten des Oszillographen so wählen, daß der Maßstab des Rasters ganzzahlige Werte, z.B. 1 cm $\hat{=}$ 5 mV, annimmt (vgl. S. 107).

Der Begriff der maximalen *Schreibgeschwindigkeit* wird heute generell auf die fotografische Registrierung bezogen. Je nach dem Aufwand an fotografischem Material und dem benutzten Entwicklungsverfahren ist natürlich ein relativ weiter Spielraum gegeben. Mit noch vertretbarem Aufwand können oszillographische Schriftzüge bis zu etwa 7000 km/s registriert werden. Darüber hinaus erreichen Spezial-Oszillographen für Stoßspannungsvorgänge Schreibgeschwindigkeiten bis zu etwa 10000 km/s.

Um mehrere Vorgänge auf einem Schirm oszillographieren zu können, gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten:

a) Verwendung einer Elektronenstrahlröhre mit mehreren Elektronenstrahlen. Diese *Mehrstrahl-Röhren* sind entweder mit mehreren kompletten Strahlsystemen ausgestattet oder ein von einer Kathode erzeugter Strahl wird durch eine Elektrodenoptik in mehrere Strahlen aufgeteilt (split-beam). Das letzte Verfahren hat den Vorteil einer exakten gemeinsamen $X$-Ablenkung. Mehrstrahl-Oszillographen werden in Deutschland gewöhnlich als Zweistrahl-Oszillographen (OSCILLAR II) hergestellt, mitunter auch mit Strahlzahlen bis zu sieben (Elektronenstrahl-OSCILLOMAT, s. S. 103).

Bild 58
Elektronischer Schalter 010 für Gleich- und Wechselspannung

b) Verwendung einer Einstrahl-Röhre und eines dem Oszillographen vorgeschalteten *Elektronischen Schalters* (Bild 58), mit dem der Oszillograph in rascher Folge auf zwei Meßvorgänge umgeschaltet wird. Die Umschalt- oder Tastfrequenz muß > 30 Hz sein, damit die am Schirm nacheinander aufgezeichneten Vorgänge dem menschlichen Auge als gleichzeitig erscheinen. Sie kann verschiedenen hoch eingestellt und bei periodischen Vorgängen auch durch die Ablenkfrequenz des Oszillographen bestimmt werden, so daß die Umschaltungen in den Strahlrücklauf fallen, also unsichtbar sind. Bei fotografischen Aufnahmen ist die Umschaltfrequenz entsprechend der Belichtungszeit zu wählen. Hat man einmalige Meßvorgänge zu oszillographieren, so muß man eine hohe Umschaltfrequenz, z.B. 100 kHz, wählen, wodurch man die beiden Meßspannungen in Meßzeiten von 5 µs auflöst. Einmalige Meßvorgänge von etwa 0,5 ms Dauer können auf diese Weise noch gut wiedergegeben werden.

Die Güte eines Oszillographen großer Bandbreite kann nur dann richtig ausgenutzt werden, wenn auch die Zuführung der Meßspannung in ihren Übertragungseigenschaften dementsprechend frequenzunabhängig ist. Der Eingangsabschluß der Zuführungsleitung wird als *Tastkopf* bezeichnet. Er enthält gewöhnlich zur Herstellung der Frequenzunabhängigkeit Widerstände und Kapazitäten (Tastteiler), kann aber auch Gleichrichter (Tastrichter) oder eine Röhrenstufe (Tastverstärker) enthalten. Im ersten Fall erfolgt durch die Einbeziehung der Leitungseigenschaften in den Eingangswiderstand des Oszillographen eine Verminderung des Ablenkkoeffizienten; der Tastkopf bewirkt eine Eingangsspannungsteilung. Im zweiten Fall erfolgt im Tastkopf eine Gleichrichtung, z.B. eine Demodulation der Trägerfrequenz der Meßspannung.

In vielen Fällen wird der Wunsch bestehen, das flüchtige Oszillogramm festzuhalten, sei es als Unterlage für das Prüfungsergebnis, sei es zum exakten Ausmessen der Kurvenzüge. Es gibt mehrere Möglichkeiten:

Handelt es sich um das Aufzeichnen rein periodischer oder impulsausgelöster Vorgänge häufiger Wiederholung, die also auf dem Leuchtschirm einen genügend ruhig stehenden Kurvenzug ergeben, so läßt sich ein *Nachzeichengerät* (Bild 59) anwenden, das im Prinzip aus einer Optik und einer Zeichenplatte besteht. Durch die Optik kann man mit Hilfe eines halbdurchlässigen, in der Symmetrieebene von Leuchtschirm und Zeichenfläche liegenden Spiegels gleichzeitig den Leuchtschirm und die Zeichenfläche beobachten. Da Schirm und Zeichenfläche für das Auge in einer Ebene befindlich erscheinen, ist es leicht, die Leuchtspur des Oszillogramms mit einem Bleistift nachzuziehen. Das Abbildungsverhältnis ist 1:1. Durch die Spiegelung entsteht allerdings eine Oben-Unten-Vertauschung, die aber dadurch ausgeglichen werden kann, daß man zum Nachzeichnen transparentes Papier benutzt, das man von hinten auswertet.

Will man Oszillogramme stehender Kurvenzüge oder einmaliger Vorgänge fotografisch aufnehmen, so kann man sich eines *Fotovorsatzes* bedienen. Das ist ein lichtdichter Schacht, an dessen eine Öffnung die Aufnahmekamera (Filmformate 24 mm × 36 mm, 24 mm × 24 mm und 6 cm × 6 cm) befestigt und dessen andere Öffnung gegen den Leuchtschirm gesetzt wird. Mit hochempfindlichem Röntgenfilm lassen sich einmalige Vorgänge bis zu Schreibgeschwindigkeiten von mehreren Tausend km/s registrieren. Bei der Aufnahme kann die Belichtungszeit entweder durch den Kameraverschluß bestimmt werden oder bei dunkelgestelltem Elektronenstrahl und geöffneter Kamera durch die Aufhellung des Strahles. Im allgemeinen wird das erste Verfahren bei periodischen, das zweite bei einmaligen und laufend veränderlichen Meßvorgängen angewendet. Bei periodischen Vorgängen ist die Öffnungszeit des Verschlusses mindestens so lang zu wählen, wie die Folgezeit der Strahlschrift auf dem Schirm beträgt (Ablenkzeit plus Rücklaufzeit), damit mindestens ein vollständiges

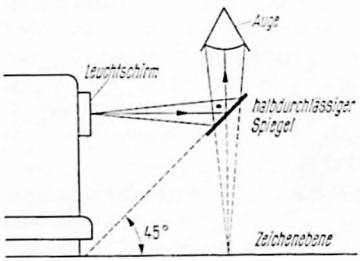



Bild 59 Nachzeichengerät, schematisch

Oszillogramm während der Öffnungszeit des Verschlusses geschrieben wird. — Neuerdings wird man auch das Polaroid-Verfahren zur Registrierung von Oszillogrammen anwenden, nämlich, wenn man Wert darauf legt, schnell ein Papierbild zu erhalten und auf ein Negativ für weitere Kopien verzichten kann.

Der *Registrierautomat* Bauart Siemens-Sörensen (Bild 60) ist universell für alle Aufnahmearten verwendbar. Er hat den Vorzug, daß die Registrierung nicht nur auf Kleinbildfilm, sondern auch auf 100 mm breitem lichtempfindlichem Papier im Verhältnis 1:1 vorgenommen werden kann, so daß die Oszillogramme schnell — ohne Vergrößern und Umkopieren — der Auswertung zugänglich sind. Das Registriergerät des Automaten ermöglicht Stand-, Ablauf- und Trommelaufnahmen. Die Standaufnahme ersetzt das Fotografieren der stehenden Kurvenbilder einmaliger oder periodischer Vorgänge mit einer Fotokamera. Bei den Ablauf- und Trommelaufnahmen entsteht die Zeitachse der Kurven durch die Bewegung des Belichtungsstreifens (die Zeitablenkung ist also abzuschalten).

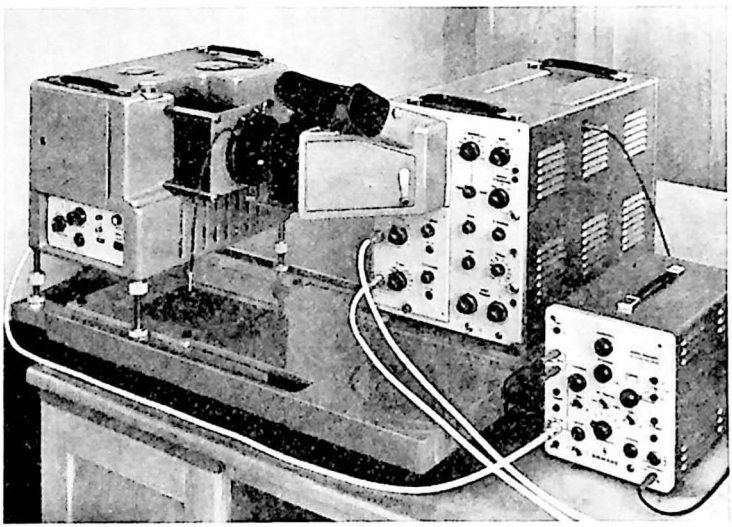


Bild 60 OSCILLAR II mit Registrierautomat Bauart Siemens-Sörensen (links Registriergerät, rechts elektronisches Steuergerät)

**Tafel 45** Siemens-Elektronenstrahl-Oszillographen

| | Elektronenstrahlröhre | | *Y*-Verstärker | | | *X*-Verstärker | | | Zeitablenkung | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Typ | Beschleunig.-Spng. | Frequenzbereich | Ablenkkoeff. | Verstärkungseinstellung | Frequenzbereich | Ablenkkoeff. | Verstärkungseinstellung | Ablenkungseinstellung | Dehnung |
| | | kV | Hz | $\frac{mV}{cm}$ | | Hz | $\frac{V}{cm}$ | | | |
| OSCILLARZET 15 (s. Bild 56, S. 94, u. Bild 61 A) | DG 7–36 | 1 | 1 bis $5 \cdot 10^6$<br>2 bis $0{,}6 \cdot 10^6$ | 35<br>6 | 4stufig bis 1000× u. jeweils stet. bis 11× | 1 bis $0{,}5 \cdot 10^6$ | 0,8 | stetig bis 200× | 6stufig (10 bis $3 \cdot 10^5$ Hz) u. jeweils stet. bis 8× | — |
| OSCILLARZET 05 (ähnl. Bild 61 B) | DG 7–74 A | 1,05 | 0 bis $5 \cdot 10^6$<br>0 bis $1{,}2 \cdot 10^6$ | 50[1])<br>15[1]) | 8stufig bis 1000× u. jeweils stet. bis 3,5× | 0 bis $0{,}8 \cdot 10^6$ | 0,7[2]) | stetig bis 200× | 11stufig ($10^{-6}$ bis $10^{-1}$ s/Tl) u. jeweils stet. bis 3,5× | 5× |
| OSCILLARZET 05S (s. Bild 61 B) | DG 7–74 A | 1,4 | 0 bis $5 \cdot 10^6$<br>0 bis $1{,}2 \cdot 10^6$ | 30[1])<br>10[1]) | 8stufig bis 1000× u. jeweils stet. bis 3,5× | 0 bis $0{,}8 \cdot 10^6$ | 0,7[2]) | stetig bis 200× | 11stufig ($10^{-6}$ bis $10^{-1}$ s/Tl) u. jeweils stet. bis 3,5× | 5× |
| OSCILLAR I/010 (s. Bild 61 C) | DG..., DB... oder DP 10–18 | 3,7 | 0 bis $10 \cdot 10^6$<br>0 bis $1{,}5 \cdot 10^6$ | 50[1])<br>10[1]) | 8stufig bis 1000× u. jeweils stet. bis 3,5× | 0 bis $2{,}5 \cdot 10^6$ | 0,35[2]) | stetig bis 5× | 11stufig ($3 \cdot 10^{-7}$ bis $3 \cdot 10^{-2}$ s/Tl) u. jeweils stetig bis 3,7× | 5× |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| OSCILLAR I (X = Y) | DG..., DB... oder DP 13–14 | 3 | 0 bis $10^6$ | 5 | 7stufig bis 1000× u. jeweils stet. bis 3,5× | 0 bis $10^6$ | $5 \cdot 10^{-3}$ | 6stufig bis 300× u. jeweils stet. bis 3,5× | 21stufig ($5 \cdot 10^{-7}$ bis 2 s/cm) u. jeweils stet. bis 3× | 3,5× |
| OSCILLAR I/040 (s. Bild 61 D) | DH 13–10 (DB... oder DN 13–10) | 15 | Breitband-verstärker 0 bis $40 \cdot 10^6$ | 50 | 9stufig bis 400× u. jeweils stet. bis 2,7× | 0 bis $2{,}5 \cdot 10^6$ | 0,1 | 8stufig bis 100× | Kipp I [3]) 25stufig ($5 \cdot 10^{-8}$ bis 5 s/cm) u. jeweils stet. bis 2,7× | 2×, 5× oder 10× |
| | | | 2 bis $27 \cdot 10^6$ | 5 | | | | | | |
| | | | Zweikanal-verst. u. elektron. Umschalter 0 bis $28 \cdot 10^6$ | 50 | 9stufig bis 400× u. jeweils stet. bis 2,7× | | | | Kipp II [3]) 21 stufig ($10^{-6}$ bis 5 s/cm) u. stet. zwisch. 4 u. 10 cm Bildbreite | |
| | | | Differenz-verstärker 0 bis $0{,}35 \cdot 10^6$ | 1 | 24stufig bis 1000× u. jeweils stet. bis 2,7× | | | | | |
| | | | max. $2 \cdot 10^6$ | 50 | | | | | | |
| OSCILLAR II (s. Bild 60) | DGM..., DBM... oder DPM 13–14 | 4 | Wechsel-spannungs-verstärker 2 bis $2{,}5 \cdot 10^6$ | 12 | 4stufig bis 1000× u. jeweils stet. bis 10× | 0 bis $0{,}38 \cdot 10^6$ | 0,05 | 3stufig bis 100× u. jeweils stet. bis 10× | 35stufig ($5 \cdot 10^{-7}$ bis 3 s/cm) u. jeweils stet. bis 2× | 6×, max. 10× |
| | | | Gleich-spannungs-verstärker 0 bis $0{,}25 \cdot 10^6$ | 5 | 4stufig bis 1000× u. jeweils stet. bis 10× | | | | | |
| | | | Differenz-verstärker 0 bis $1{,}5 \cdot 10^6$ | 5 | 11stufig bis 2000× u. jeweils stet. bis 2,5× | | | | | |
| Elektronenstrahl-OSCILLOMAT | s. S. 103ff. | | | | | | | | | |

[1]) mV/Tl. [2]) V/Tl. [3]) Kipp = Kippgenerator.

Ablaufaufnahmen lassen Papiergeschwindigkeiten bis 10 m/s zu; es können dabei Streifen bis 2 m Länge in einem Zuge geschrieben werden (bei niedrigeren Geschwindigkeiten bis 5 m einstellbarer Länge). Trommelaufnahmen lassen bei nutzbaren Streifenlängen von 40 cm Papiergeschwindigkeiten bis 30 m/s zu. Das elektronische Steuergerät des Automaten dient dazu, die mechanischen Vorgänge des Registriergerätes mit den elektrischen des Oszillographen und der Meßschaltung zu synchronisieren; es steuert trägheitslos den gleichzeitigen Beginn des Meßvorgangs, der Belichtung und der Zeitauflösung.

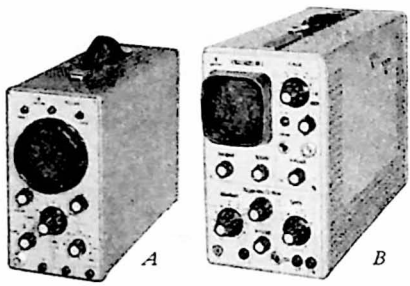
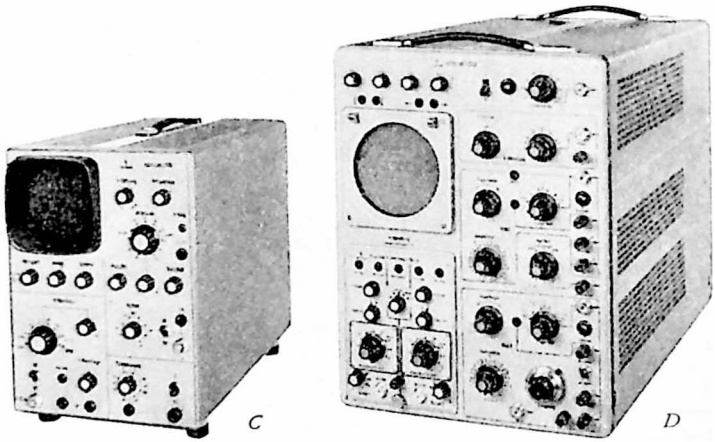



Bild 61
Ausführungsbeispiele von Elektronenstrahl-Oszillographen
*A* Kleinoszillograph OSCILLARZET 15
*B* Kleinoszillograph OSCILLARZET 05 S
*C* Impuls-Oszillograph OSCILLAR I/010
*D* Breitband-Oszillograph OSCILLAR I/040



Als Pendant zum Lichtstrahl-OSCILLOMAT (s. Bild 54, S. 91) bildet der Elektronenstrahl-OSCILLOMAT (Bilder 62 und 63) eine *Brücke zwischen der Lichtstrahl- und der Elektronenstrahl-Oszillographie*: Die gemeinsame Aufzeichnung von max. sieben voneinander unabhängigen Vorgängen ($f = 0$ bis $0{,}2 \cdot 10^6$ Hz) wird erreicht durch eine Anordnung von sieben Elektronenstrahlröhren (DB 7—14, Beschleun.-Spng. 6 kV), deren äußerst helle Schirmbilder — sie bestehen nur aus $Y$-Ablenkspuren — von sieben Objektiven in den Belichtungsschlitz einer Hochleistungs-Registriereinrichtung projiziert werden. Hinter dem Schlitz läuft zur zeitlichen Auflösung ($X$-Ablenkung) ein Streifen lichtempfindliches Papier mit hoher Geschwindigkeit ab, der etwa 10 s später, nach Durchlaufen des Direkt-Entwicklungs-Automaten, als Oszillogramm zur Auswertung bereitliegt. Zeitmarken am Rande bringt ein auswechselbarer Zeitskalenschreiber an.

Während in der Lichtstrahl-Oszillographie Schreibgeschwindigkeiten von 10 km/s das Maximum darstellen, sind mit dem Elektronenstrahl-OSCILLOMAT Schreibgeschwindigkeiten von über 15 km/s zu erreichen. Die Registriereinrichtung sowie die Überwachungs- und Steuereinrichtungen entsprechen denen des Lichtstrahl-OSCILLOMAT (vgl. S. 87). Es läßt sich ein Polygonspiegel mit einer Mattscheibe einbauen, auf der die Schwingungsvorgänge von max. fünf Meßkanälen unmittelbar veranschaulicht werden. Ablenkkoeffizient eines $Y$-Verstärkers: $\approx$ 140 mV/cm; Verstärkungseinstellung: 7stufig, bis 600×.

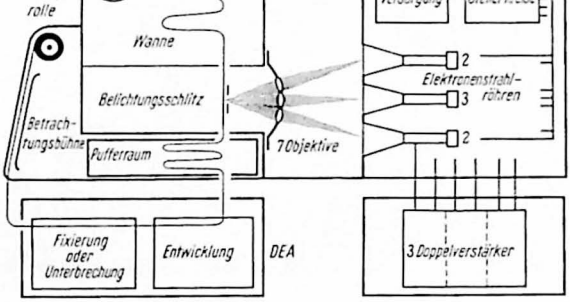



Bild 62 Grundsätzlicher Aufbau des Elektronenstrahl-OSCILLOMAT

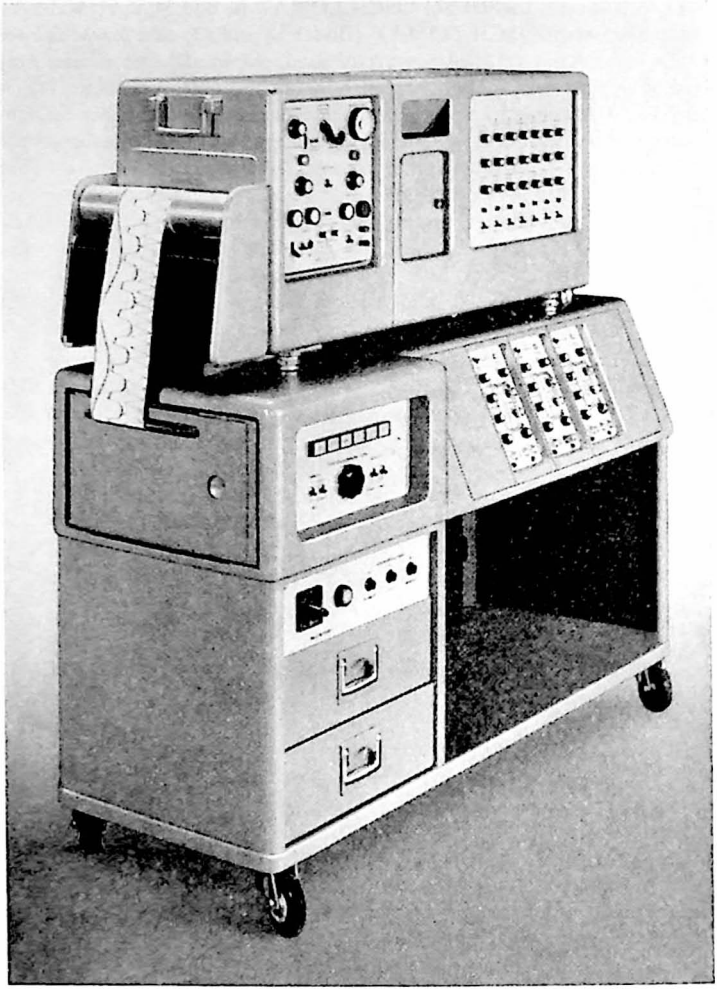


Bild 63 Elektronenstrahl-OSCILLOMAT
mit Direkt-Entwicklungs-Automat und Aufspulvorrichtung

**Wissenswertes für die Benutzung von Elektronenstrahl-Oszillographen:**

*Auswahl nach den Erfordernissen des Meßvorgangs.* Oszillographenverstärker gibt es als Wechselspannungs- und als Gleichspannungsverstärker für schmale und für breite Frequenzbänder. Mit Wechselspannungsverstärkern können nur Wechselspannungen, mit Gleichspannungsverstärkern jedoch sowohl Wechselspannungen als auch Gleichspannungen verstärkt werden, also demnach auch Wechselspannungen und deren Gleichspannungskomponente.

Bei der Auswahl des Oszillographen ist daher zuerst festzustellen, ob die zu oszillographierenden Meßvorgänge Gleichspannungskomponenten enthalten und ob deren Erfassung auch notwendig ist.

Eine zweite Entscheidung ist hinsichtlich der Wiedergabegüte zu treffen. Unter der Voraussetzung, daß die in der Meßspannung enthaltenen Oberschwingungen in ihrem Verhältnis zur Amplitude der Grundschwingung mindestens proportional der Frequenz abnehmen, beträgt die Amplitude der 50. Oberschwingung nicht mehr als 2% der Grundamplitude. Das ist, soweit es sich nicht um Oberschwingungsgeneratoren und spezielle Untersuchungen der Frequenzvervielfachung handelt, auch meist der Fall. Man erhält, wenn die 50. Oberschwingung in der oberen Bandgrenze mit —30% (gleich —3 dB) wiedergegeben wird, einen Übertragungsfehler von etwa 1%. Untersucht man meist periodische Meßvorgänge, so kann man also die im Oszillographen erforderliche Mindestbandbreite durch das Produkt Grundfrequenz × 50 abschätzen.

Bei Meßvorgängen in der Impulstechnik darf man davon ausgehen, daß die Impulsanstiegszeiten durch den Oszillographenverstärker nicht unzulässig vermindert werden. Da die resultierende Anstiegszeit $t_r$ aus der Anstiegszeit $t_i$ des Impulses und aus der Anstiegszeit $t_0$ des Oszillographen nach der Gleichung

$$t_r = \sqrt{t_i^2 + t_0^2}$$

errechnet werden kann, ergibt sich für die Einhaltung einer Fehlergrenze $\leq 2\%$ ($\leq 5\%$) eine Anstiegszeit $t_0$, die 5- (3-)mal kleiner als $t_i$ ist.

*Einfluß abweichender Netzspannung.* Die Spannungen unserer elektrischen Netze werden hinsichtlich der Frequenz gut konstant gehalten. Die Bemühungen der Kraftwerke, auch die Amplitude der Netzspannung konstant zu halten, machen sich jedoch um so weniger an der Verbrauchsstelle bemerkbar, je ungünstiger die Verhältnisse der Zuleitungen (Länge und Querschnitt) sind: Belastungsschwankungen können zu beträchtlichen Spannungsschwankungen und -stößen führen.

Will man an einem starken Schwankungen unterworfenen Netz einen Oszillographen betreiben, so hat man normalerweise keine Möglichkeit, die Ursachen der Netzspannungsschwankungen zu beseitigen. Daß der Oszillograph trotzdem unabhängig von Netzspannungsschwankungen und -stößen (etwa in den Grenzen von $\pm 10\%$ $U_n$) einwandfrei arbeitet, erfordert einen Mehraufwand im Oszillographen. Seine Betriebsspannungen werden deshalb, soweit unbedingt erforderlich, stabilisiert, die Heizspannung an der Elektronenstrahlröhre und den Elektronenröhren aber, von ganz wenigen Sonderfällen abgesehen, nicht. Dadurch können sich Röhrenschäden ergeben, wenn man das Gerät mit mehr als 5% Unterspannung betreibt.

Damit nun die Justierung des Elektronenstrahl-Oszillographen möglichst lange erhalten bleibt, ist es empfehlenswert, diesem einen Spannungskonstanthalter vorzuschalten, beispielsweise einen magnetischen, der Netzspannungsschwankungen von $\pm 10\%$ auf etwa $\pm 2\%$ ausgleicht.

*Einfluß äußerer Felder.* Bei Messungen mit Elektronenstrahl-Oszillographen muß darauf geachtet werden, daß der Oszillograph nicht im Bereich starker elektrischer Felder steht. Da das Meßprinzip auf der Ablenkung eines Elektronenstrahls durch meßwertproportionale elektrostatische oder elektromagnetische Felder beruht, muß ein den Meßfeldern überlagertes Störfeld zwangsläufig zur Verfälschung der Anzeige führen. In den meisten Oszillographen ist deshalb schon die Kathodenstrahlröhre durch eine metallische Abschirmung gegen die Einwirkung äußerer Felder geschützt. Diese genügt aber nicht, wenn sich der Oszillograph im Bereich des Feldes einer Hochspannungsleitung oder in der Nähe von Starkstromleitungen befindet. Das Messen z.B. in der nahen Umgebung von Elektroschweißmaschinen, Elektroschmelzöfen, Großgleichrichtern und Starkstromtransformatoren ist also möglichst zu vermeiden. Ist es jedoch unumgänglich, so muß die Schirmung der Kathodenstrahlröhre durch mehrlagige Schirmzylinder aus hochpermeablem Blech oder auch durch mehrfache, sich vollständig überdeckende Schirmgehäuse gesteigert werden.

*Oszillographieren von Spannungen über Tastteiler* (s. S. 97). Der Eingang eines Elektronenstrahl-Oszillographen hat gewöhnlich einen ohmschen Widerstand von 1 MΩ, dem eine Kapazität gegen Erde in der Größe zwischen 20 und 50 pF zugeordnet ist. Der Eingangsscheinwiderstand des Oszillographen ist also sehr hoch und in den weitaus meisten Fällen ohne Einfluß auf die zu oszillographierende Spannung. Nur in Schaltungen mit sehr hohem Innenwiderstand, z.B. in Kreisen sehr hoher Isolationswiderstände, an Punkten geringer Ableitung (Gitter von Elektronenröhren) und in Hochfrequenzschaltungen (wegen des zunehmenden Einflusses der Eingangskapazität mit wechselnder Frequenz) ist mit einer Rückwirkung des Oszillographen auf die Meßschaltung zu rechnen.

Wird durch den Oszillographeneingang die Meßspannung stark verfälscht, so kann mittels eines Tastteilers der Eingangswiderstand erhöht werden. Dies setzt jedoch voraus, daß für die Darstellung der Meßspannung am Schirm nicht bereits schon die volle Empfindlichkeit des Oszillographen benötigt wird, denn der höhere Eingangswiderstand wird durch eine Spannungsteilung hervorgerufen.

Tastteiler haben gewöhnlich ein Spannungsteilerverhältnis von 10:1; der Ablenkkoeffizient des Oszillographen wird also mit ihm auf ein Zehntel vermindert. Der Eingangswiderstand eines Tastteilers beträgt etwa 10 MΩ bei einer Parallelkapazität von 8 bis 10 pF.

*Schärfe der Strahlspur.* Durch Wahl der Gitter- und Anodenspannungen wird der Elektronenstrahl in der Schirmebene fokusiert. Eine Nachstellung der Schärfe kann am Bedienungsknopf „Schärfe" (oder „Fokus") erfolgen. Sehr hochwertige Geräte haben eine zweite Nachstellung mit der Bezeichnung „Astigmatismus".

Tritt beim Anlegen der Meßspannung eine wesentliche Änderung der Strahlschärfe ein, so liegt das meist daran, daß die Meßspannung durch ein gegen Null wesentlich verschiedenes Potential angehoben und dadurch das elektronenoptische System der Röhre gestört ist. Das kann man vermeiden, indem man die Meßspannung über einen Kondensatoreingang zuführt, oder — falls dabei die Meßspannung verfälscht wird — indem man in die Anodenspannungsbeziehung des Strahlsystems die Potentialgröße der Meßspannung einbezieht.

*Filterscheiben, Lichtschutztubus.* Um den Kontrast der Strahlspur zu erhöhen und um Reflexe zu unterdrücken, die durch Lichtquellen im Meßraum hervorgerufen werden, setzt man Filterscheiben vor den Oszillographenschirm. Grundsätzlich sollte man bei visueller Beobachtung stets einen Lichtschutztubus vor dem Schirmbild anbringen, dessen Zylinderlänge etwa gleich dem Durchmesser des Schirmes ist.

Bei fotografischen Aufnahmen und bei der Registrierung empfiehlt es sich, die Filterscheibe nach der Farbempfindlichkeit des lichtempfindlichen Materials auszuwählen. Dies kann zu einer wesentlichen Verbesserung der Aufnahmen, besonders bei hohen Schreibgeschwindigkeiten, führen.

*Vorsatzskalen.* Den Bildschirmen der Oszillographen sind vielfach Skalenscheiben vorgesetzt. Bei großen Oszillographen werden die Skalen durch quer in die Scheibe gestreutes Licht weiß oder farbig beleuchtet. Eine rotleuchtende Skale wird dann gewählt, wenn sie bei der fotografischen Aufnahme nicht abgebildet werden soll.

Es empfiehlt sich, den Ablenkkoeffizienten des Oszillographen so einzustellen, daß die Skalenteilung ganzzahligen Werten der Amplitude entspricht. Dies geschieht am besten, nachdem das gewünschte Oszillogramm grob eingestellt wurde. Man schaltet auf die im Oszillographen eingebaute oder auf eine außenliegende Vergleichsspannungsquelle um, gibt ihr eine ganzzahlige Größe, die am Bildschirm ungefähr mit der vorher gewählten Oszillogrammhöhe übereinstimmt, und stellt am Einstellknopf für Verstärkung so weit nach, bis sich die Vergleichsspannungsamplitude mit dem Raster der Skale deckt. Hat man z. B. ein Oszillogramm grob auf 48 mm Höhe eingestellt und findet mittels der Vergleichsspannung, daß dieser Höhe eine Spannungsamplitude von 2,2 mV entspricht, so stellt man die Vergleichsspannung auf 2,5 mV ein und bringt durch Änderung der Verstärkung die Höhe der Vergleichsspannungsamplitude auf 50 mm. Man hat damit also einen Maßstab der Skale von 0,5 mV/cm festgelegt und kann nunmehr alle im weiteren Verlauf der Messungen auftretenden Amplituden der Oszillogramme schnell abschätzen.

*Synchronisieren.* Die Einstellung der Synchronisieramplitude muß meist den Erfordernissen angepaßt werden. Hier gilt die Regel, die Synchronisieramplitude so klein wie möglich zu wählen, gerade noch so weit ausreichend, daß der Synchronisierzwang sicher erreicht wird, also das Oszillogramm steht.

Bei Impulsauslösung der Zeitablenkung ist zu beachten, daß auch Triggeramplitude möglichst klein eingestellt wird; dies ist dann der Fall, wenn der Einstellknopf „Triggern — periodisch" möglichst wenig aus der neutralen Mittellage heraus in die Richtung „Triggern" verstellt wird (Triggerauslösung s. S. 95).

*Frequenzvergleich mit dem Oszillographen.* Als Indikator für Frequenzdifferenzen ist der Oszillograph hervorragend geeignet. Man nimmt in diesem Fall gewöhnlich die Meßspannung zur Aussteuerung der vertikalen Richtung und die Vergleichsspannung zur Aussteuerung der horizontalen Richtung. Ein stehendes Bild erhält man nur im Falle genauer Frequenzübereinstimmung oder im Falle genauer Übereinstimmung in einem ganzzahligen Frequenzverhältnis. Noch deutlichere Bildverhältnisse erhält man, besonders bei großen Frequenzunterschieden, wenn man aus der horizontalen Ablenkspannung durch Phasendrehung eine um 90° verschobene Spannung erzeugt und zu einem Teil der vertikalen Ablenkspannung beifügt. Die dadurch entstehende Figur zeigt die Schwingungen der Meßspannung auf einer elliptischen Grundlinie und ermöglicht eine bequeme Auszählung des Frequenzverhältnisses und eine genaue Beobachtung der aus einem noch vorhandenen Frequenzunterschied entstehenden Bewegung.

*Der Oszillograph als Nullindikator.* Wenn der Elektronenstrahl-Oszillograph in den meisten Fällen zwar zur Darstellung von Kurvenformen, Phasenbeziehungen, Amplitudenvergleichen, Störspannungen und Frequenzverhältnissen dient, so ist er doch auch ein ausgezeichnetes Hilfsmittel zur Nullindikation. Bei Wechselstrom-Meßbrücken kann er in vielen Fällen den lästigen Kopfhörer ersetzen, zumal er sogar die Annäherung gegen Null in den richtigen Phasenbeziehungen anzeigt.

## Digital-Meßgeräte

**Digitale Meßwert-Darstellung.** Die bisher übliche Art des Messens, bei der der Stellung eines Zeigers oder eines Schreiborgans erst beim Ablesen mittels einer Skalenteilung ein Zahlenwert zugeordnet werden muß, beruht auf der *analogen Meßwert-Darstellung:* Die Weite des Ausschlags ist analog dem Wert der zu messenden Größe, d.h. der Meßwert wird als entsprechende Länge oder als entsprechender Drehwinkel dargestellt. Die *digitale Meßwert-Darstellung* liefert dagegen den Meßwert unmittelbar als Zahl (Bild 64). Abgesehen von der Möglichkeit, bei dieser Darstellung den Meßwert besonders bequem und schnell ablesen zu können (Serienmessungen), kann das quantisiert vorliegende Meßergebnis auf einfache Weise registriert, fernübertragen und weiterverarbeitet werden.

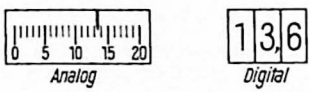



Bild 64
Analoge und digitale Meßwert-Darstellung

Quantisiert wird mit *Analog/Digital-Umsetzern*, die an das Kompensations- bzw. Brückenverfahren oder an das Ausschlagsverfahren anknüpfen. Zur ersten Art gehören Stufen-, Sägezahn- und Spannungsfrequenzumsetzer und zur zweiten Skalenstrecken- und Scheibenumsetzer. Der Stufenumsetzer ist beim Präzisions-Digital-Ohmmeter verwirklicht und der Skalenstreckenumsetzer beim DIGIZET-Grundgerät der Digital-Betriebsmeßeinrichtungen nach dem DIGIZET-System.

**Präzisions-Digital-Ohmmeter.** Der zu messende Widerstand $R_X$ bildet einen Zweig einer Wheatstonebrücke (Bild 65), die nach dem Drücken einer Meßtaste selbsttätig abgeglichen wird: Ausgehend vom höchsten

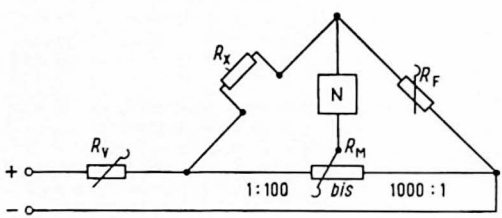



Bild 65
Brückenabgleich, schematisch
$R_X$ zu messender Widerstand
$R_M$ Meßbereichabgleich
$R_F$ Feinabgleich
$N$ Nullindikator
$R_V$ Vorwiderstand

Widerstandsbereich werden mit $R_M$ die Brückenverhältnisse abgetastet und zunächst der Meßbereich mit Kommastellung und Einheit festgelegt. Daran schließt sich an $R_F$ der Abgleich der einzelnen Dekaden an, um die Ziffernfolge des Meßwertes festzulegen. Ein Nullindikator $N$ (elektronischer Verstärker) entscheidet, ob der Widerstandswert der einzelnen Abgleichstufe in das Meßergebnis eingeht oder nicht und ob er gegebenenfalls mittels Relais gespeichert werden muß. Der Widerstandswert

**Tafel 46** Codierung der Widerstände 0 bis 9 $(10^n)\ \Omega$

| Abgleichstufe | Eingeschaltete Widerstände |
|---|---|
| 0 $(10^n)$ | $(10^n)$ |
| 1 $(10^n)$ | $(10^n)$ 1 |
| 2 $(10^n)$ | $(10^n)$ 2 |
| 3 $(10^n)$ | $(10^n)$ 2 1 |
| 4 $(10^n)$ | $(10^n)$ 2 2 |
| 5 $(10^n)$ | $(10^n)$ 2 2 1 |
| 6 $(10^n)$ | $(10^n)$ 4 2 |
| 7 $(10^n)$ | $(10^n)$ 4 2 1 |
| 8 $(10^n)$ | $(10^n)$ 4 2 2 |
| 9 $(10^n)$ | $(10^n)$ 4 2 2 1 |

Bild 66 Präzisions-Digital-Ohmmeter mit Grenzwert-Kontrolleinrichtung (oben) und Meßwertdrucker (links)

jeder Abgleichstufe liegt im Stufenumsetzer als Kombination der Einzelwiderstände 4-2-2-1 ($10^n$) Ω codiert vor (Tafel 46).

Der Wert 32 ergibt sich beispielsweise aus 40 20 **20 10**/4 2 **2 1**. — Während des Abgleichvorgangs (etwa 0,6 s) wird der Vorwiderstand $R_V$ stets so umgeschaltet, daß die Belastung des Prüflings nicht über 10 mW steigt, aber doch eine optimale Speisespannung anliegt.

Der Meßbereichumfang des Präzisions-Digital-Ohmmeters beträgt $10^{-2}$ bis $10^9$ Ω, die Anzeigetoleranzen sind ± 0,05% oder ± 1 Einheit der letzten Stelle für Werte bis 1 MΩ, ± 0,1% für 1 bis 10 MΩ, 1% für 10 bis 100 MΩ und 10% für 100 bis 999 MΩ. Bild 66 zeigt das Gerät. Die oben aufgesetzte *Grenzwert-Kontrolleinrichtung* und der links stehende *Meßwertdrucker* ermöglichen zusammen mit einem *Programmgeber* und einer *Sortiereinrichtung* automatische Messungen entsprechend Bild 67.

Zur Messung des Aderwiderstandes von Fernmeldekabeln wird das Digital-Ohmmeter mit einem Sondereinschub verwendet, der für einen Meßbereichumfang von $10^{-2}$ bis $10^3$ Ω ausgelegt ist. Zusammen mit einem *Differenzrechner* kann die Differenz zweier Aderwiderstände automatisch ermittelt werden.

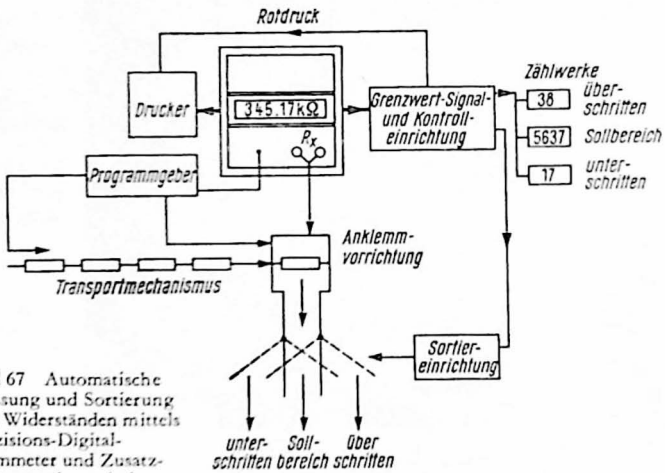



Bild 67 Automatische Messung und Sortierung von Widerständen mittels Präzisions-Digital-Ohmmeter und Zusatzgeräten, schematisch

**Digital-Betriebsmeßeinrichtungen nach dem DIGIZET-System.** Im DIGIZET-*Grundgerät* wird von dem eingebauten Schalttafelinstrument mit Lichtmarkenablesung (S. 49) die Auslenkung der spaltförmigen Lichtmarke, d. h. die von ihr überstrichene Skalenstrecke, in die digitale Form umgesetzt (vgl. Bild 68): Über der Analogskale ist im Innern des Instruments ein Zylinderspiegel mit einem doppelten Hell-Dunkel-Raster angeordnet das stets gleichzeitig mit der Skale vom Lichtzeiger bestrichen wird. Die dabei vom oberen und unteren Raster erzeugten Lichtimpulse treffen auf je eine oberhalb des Meßwerks in der Brennlinie des Spiegels angebrachte Fotozelle. Beide Fotozellen geben entsprechende Spannungsimpulse ab (bei Vollausschlag $2 \times 50$), jedoch nicht während des Lichtzeigerausschlags, sondern erst nach der endgültigen Einstellung auf den Meßwert und der dann kurzzeitigen Abtrennung des Instruments von der Meßquelle, also beim Zurücklaufen der Lichtmarke auf Null! Dadurch wird die Unabhängigkeit vom Einschwingvorgang des beweglichen Organs erreicht. Gezählt werden die Spannungsimpulse nach Verstärkung usw. elektronisch. Die Zähldekaden haben Ausgänge, die eine Weiterverarbeitung der Meßwerte möglich machen.

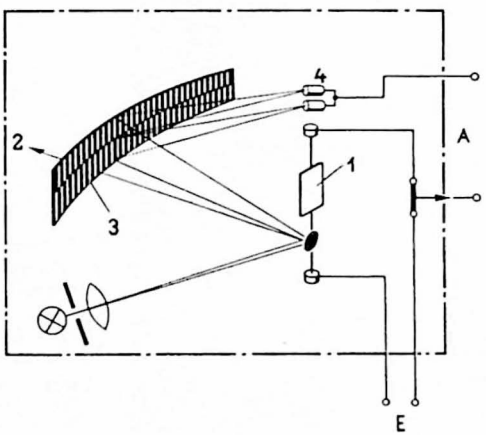



Bild 68 Skalenstreckenumsetzer, schematisch
1 Meßwerk mit Spiegel
2 Analoganzeige
3 Spiegelraster
4 Fotozellen
E Eingang
A Ausgang

Das DIGIZET-System (Aufbau einer Betriebsmeßeinrichtung s. Bild 69) ist immer verwendbar wenn die zu messende Größe elektrisch angezeigt werden kann. Die kleinsten Einheiten betragen durch die gegebene Quantisierung 2,5 mV oder 1 μA. Bei Verwendung als Anzeigeinstrument

in Brücken- oder Kompensationsschaltungen lassen sich auch Abweichungen von einem vorgegebenen Sollwert digital erfassen. Das DIGIZET-*Verarbeitungsgerät* mit Meßbereichwähler, Vor- und Nebenwiderständen, macht die Einrichtung schließlich mit einem Vielfachinstrument der MULTIZET-Serie (S. 53) vergleichbar. Ein besonderer Programmgeber, der beim Hin- und Rücklauf der Lichtmarke die Zählimpulse zählen läßt, ermöglicht auch die digitale Messung ballistischer Stöße. Die Meßergebnisse können von einem Projektions-Ziffernanzeiger im Verarbeitungsgerät angezeigt, von einem *Meßwertdrucker* ausgedruckt, von einem *Locher* in Lochstreifen umgesetzt oder in ein DIGIZET-*Auswertegerät* zum Integrieren, Klassieren und damit zum Steuern von *Sortiereinrichtungen* eingegeben werden.

Die Anzeigetoleranz setzt sich zusammen aus dem Quantisierungsfehler von $\pm 0{,}5\%$ und dem der Klassenangabe des verwendeten Instruments entsprechenden Fehler.

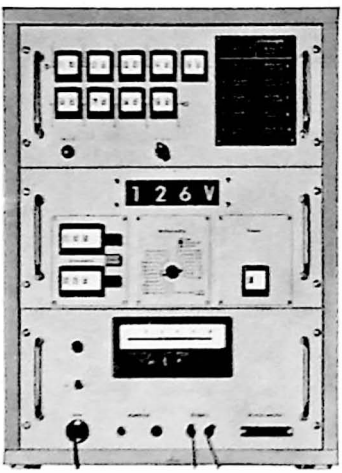


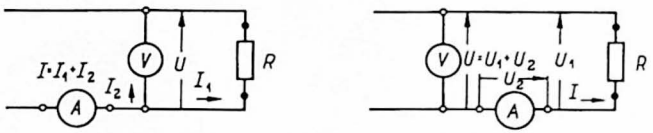

Bild 69
Digital-Betriebsmeßeinrichtung des DIGIZET-Systems
Unten: DIGIZET-Grundgerät
Mitte: DIGIZET-Verarbeitungsgerät
Oben: DIGIZET-Auswertegerät

# V. Strom- und Spannungsmessung

## Allgemeines

Strommesser werden in die Leitung geschaltet, deren Strom gemessen werden soll, Spannungsmesser an die Punkte gelegt, deren Spannungsunterschied zu bestimmen ist. Ein Strommesser darf also nur einen kleinen Spannungsfall verursachen, d. h., sein Klemmenwiderstand muß klein sein; ein Spannungsmesser darf dagegen nur wenig Strom aufnehmen, d. h., sein Klemmenwiderstand muß möglichst groß sein.

Sollen Strom und Spannung gleichzeitig gemessen werden, so können die Schaltungen nach Bild 70 *A* und *B* gewählt werden, die sinngemäß auch für den Anschluß der Strom- und Spannungspfade von Leistungsmessern brauchbar sind.




Schaltung *A* Schaltung *B*

Bei der Schaltung *A* wird die richtige Spannung $U$ gemessen, jedoch der Strom $I = I_1 + I_2$. Ist $I_1/I_2$ groß, so ist die Schaltung trotzdem geeignet.
Bei der Schaltung *B* wird der richtige Strom $I$ gemessen, jedoch die Spannung $U = U_1 + U_2$. Diese Schaltung ist geeignet, wenn $U_1/U_2$ groß ist.

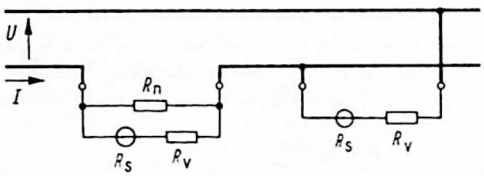
Bild 70 Strom- und Spannungsmessung am Verbraucher *R*

Ist bei Feinstmessungen der schaltungsbedingte Meßfehler zu berücksichtigen, dann bevorzugt man die Schaltung *A*, weil der Klemmenwiderstand des Spannungsmessers meist bekannt und gegenüber dem des Strommessers in höherem Maße unveränderlich ist.

## Gleichstrom- und Gleichspannungsmessung

**Drehspul-Strom- und -Spannungsmesser** (Meßwerke s. S. 36). Anschlüsse sowie *Innenschaltungen* zeigt Bild 71. Bei beiden Arten ist der Drehspule, die aus Kupferdraht besteht und deren Widerstand $R_s$ folglich temperaturabhängig ist, ein mehrfach größerer temperaturunabhängiger Widerstand $R_v$ (MANGANIN) vorgeschaltet. Dadurch wird der Kupferanteil am Gesamtwiderstand klein und der Temperaturfehler in zulässigen Grenzen gehalten. Bei Strommessern für Betriebsmessungen mit einem

$R_s \approx 1{,}8\,\Omega$ bringt man $R_s + R_v$ z. B. auf $6\,\Omega$. Bei Spannungsmessern wird $R_v$ im allgemeinen so bemessen, daß der Klemmenwiderstand einem für das Instrument charakteristischen Wert $1/I$ (vgl. S. 27) von etwa $1000\,\Omega/V$ entspricht. Für Sonderzwecke, z. B. für Messungen an Röhrenschaltungen oder von *p*H-Spannungswerten, kann er auch einem wesentlich größeren Wert entsprechen, z. B. $50000\,\Omega/V$ beim µA-MULTIZET. (Über leistungslose Spannungsmessungen s. S. 133.)




$R_s$ Drehspulwiderstand
$R_v$ Vorwiderstand
$R_n$ Nebenwiderstand

Bild 71 Schaltungen von Drehspul-Strom- und -Spannungsmessern

Die beim Drehspul- (und Drehmagnet-) Strommesser entsprechend dem Meßbereich verwendeten Nebenwiderstände $R_n$ sind so abgeglichen, daß sich bei Nennstrom mit einer der Klasse entsprechenden Genauigkeit ein festgelegter Nennspannungsfall $I_n R_n$ ergibt (z. B. bei Betriebsmeßgeräten 60, 150 oder in Ausnahmefällen 300 mV, bei Feinmeßgeräten 30 oder 45 mV). Man kann also eine Strommessung mit Nebenwiderstand auch als Spannungsmessung auffassen, bei der dem Nennspannungsfall am Nebenwiderstand Zeigervollausschlag entspricht. Der erforderlichen Konstanz wegen ist $R_n$ aus temperaturunabhängigem Widerstandsmaterial hergestellt.

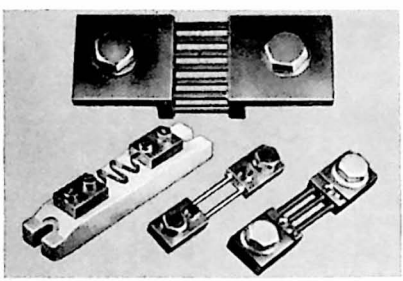
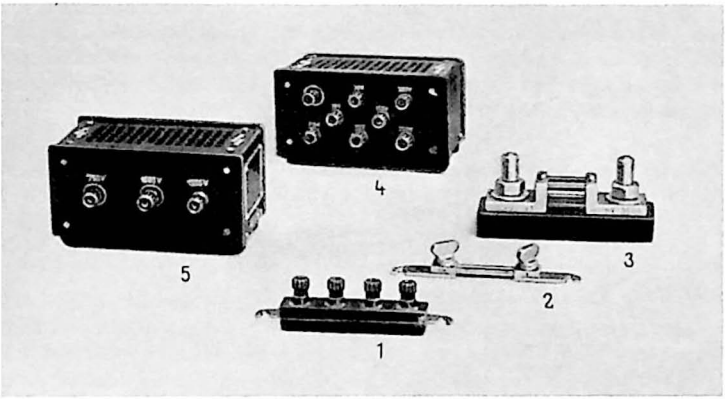


Bild 72
Nebenwiderstände 60 mV zum Einbau in den Leitungszug für Nennstrom $I_n$ = 1000, 15, 60 und 150 A

Nebenwiderstände können eingebaut sein oder außen liegen, wie zum Messen größerer Nennströme oder bei Feinmeßgeräten. Mit *außenliegenden Nebenwiderständen* dürfen nur Strommesser betrieben werden, die dafür bestimmt sind. Für Schalttafelinstrumente und Schreiber werden sie zum Einbau in den Leitungszug ausgeführt (Bild 72), für Betriebsinstrumente zum Gebrauch an verschiedenen Orten und für Feinmeßinstrumente entweder zum Anstecken an die Klemmen oder zum Aufstellen am Meßort (Bild 73). Außenliegende Nebenwiderstände können gegeneinander ausgetauscht werden, so daß der Meßbereich entsprechender Instrumente in weiten Grenzen erweitert werden kann (s. z. B. Tafel 47).




1 Nebenwiderstände von 15 mA bis 30 A, Vorwiderstände von 60 bis 1500 mV
2 Nebenwiderstände von 75 bis 150 A
3 Nebenwiderstände von 300 bis 1500 A
4 Vorwiderstand 7,5 bis 750 V
5 Vorwiderstand 1500 V zum Anschluß an 750-V- oder 1000-V-Klemme

Bild 73 Ausführungsformen von Neben- und Vorwiderständen zu den Präzisionsinstrumenten für Gleichstrom

*Mehrfach-Nebenwiderstände* bestehen aus einer Reihenschaltung von Nebenwiderständen, zu der das Instrument stets parallel liegt. Der Hauptstrom wird dem einen Ende der Reihenschaltung zugeführt und, je nach dem gewünschten Meßbereich, an einer der Abzweigungen zwischen den Nebenwiderständen abgenommen. In der Anordnung nach Bild 74 dient

ein Drehschalter zum Umschalten; beim kleinsten Nennstrom liegen alle Widerstände im Hauptstromkreis, beim größten nur der linke Widerstand, so daß die beiden anderen dem Instrument als Vorwiderstände vorgeschaltet sind. Der linke Widerstand muß also, damit das Instrument den für Vollausschlag erforderlichen Nennspannungsfall erhält, so bemessen

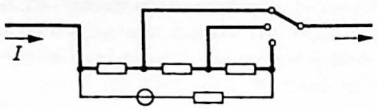
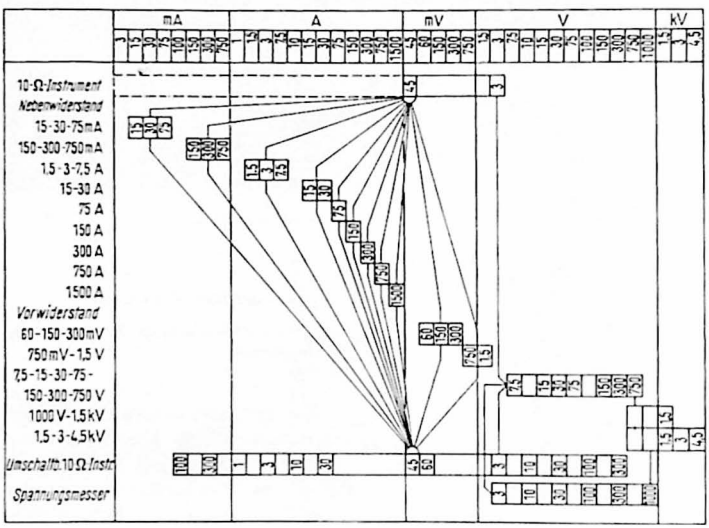



Bild 74
Mehrfach-Nebenwiderstand

sein, daß sein Spannungsfall um den durch den Instrumentenstrom an den beiden anderen Widerständen verursachten Spannungsfall größer ist. Da der Drehschalter im Hauptstromkreis liegt, haben die Übergangswiderstände keinen Einfluß auf die Messung.

**Tafel 47** Erweiterung der Strom- und Spannungsmeßbereiche von Präzisionsinstrumenten für Gleichstrom (vgl. Tafel 33, S. 60)

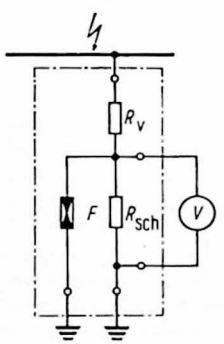


*Nebenwiderstandszuleitungen* (s. Tafel 48) müssen einen bestimmten, beim Justieren des Nebenwiderstandes berücksichtigten Widerstandswert haben, z. B. für Hin- und Rückleitung bei Betriebsmeßgeräten 60 mΩ, bei Feinmeßgeräten 15 mΩ. Es empfiehlt sich, bei Feinmessungen die Leitungen unter Einhaltung der 15 mΩ möglichst lang zu wählen, um Beeinflussungen des Instrumentes durch Starkstromleitungen zu vermeiden. Bei Instrumenten für 60-mV-Nebenwiderstände können Zuleitungswiderstände bis 0,5 Ω einjustiert werden. Darüber müssen Nebenwiderstände mit höheren Spannungsfällen gewählt werden.

**Tafel 48** Übliche Nebenwiderstandszuleitungen

| Betriebsmeßgeräte 2 · 30 mΩ | | Feinmeßgeräte 2 · 7,5 mΩ | |
|---|---|---|---|
| Länge | Querschnitt | Länge | Querschnitt |
| m | mm² | m | mm² |
| 1,3 | 0,75 | 1 | 2,5 |
| 1,7 | 1 | 2,5 | 6 |
| 2,6 | 1,5 | | |
| 4,3 | 2,5 | | |
| 7 | 4 | | |
| 10,5 | 6 | | |

Der Meßbereich von Spannungsmessern läßt sich durch *äußere Vorwiderstände* erweitern, die für Tischinstrumente der Betriebsmeßgeräteklassen und für Feinmeßinstrumente (s. Tafel 47 und Bild 73) zum Anstecken oder Anklemmen geliefert werden. Vorwiderstände für Hochspannung sind mit einem Pfeil gekennzeichnet. — In einpolig geerdeten Hochspannungsanlagen kann bis 15 kV mit einer Spannungsteilerschaltung nach Bild 75 gemessen werden. Vorwiderstand, Schutzwiderstand und Funkenstrecke sind zusammengebaut.




$R_v$ Vorwiderstand
$R_{sch}$ Schutzwiderstand
$F$ Schutzfunkenstrecke (350 V)

Bild 75 Schaltung eines Spannungsmessers in einer einpolig geerdeten Hochspannungsanlage

**Dreheisen-Strom- und -Spannungsmesser** (Meßwerke s. S. 41). Im allgemeinen ist ihr Eigenverbrauch größer als der vergleichbarer Drehspulinstrumente und ihre Skalenteilung weniger linear. Für Schalttafeln und Geräte werden sie aber trotzdem bevorzugt, weil sie robuster und preisgünstiger sind. Während mit den Präzisions-Strom- und -Spannungsmessern für Wechsel- und Gleichstrom (s. Tafel 33, S. 60) die Messungen bei beiden Stromarten unter den gleichen Klassenbedingungen durchgeführt werden können, ist das mit den hochempfindlichen Dreheisen-Präzisionsinstrumenten nicht möglich. Sie sind für Wechselstrom- und Wechselspannungsmessungen entwickelt worden, wobei besonders auf eine geringe Kurvenformabhängigkeit Wert gelegt wurde.

Der Meßbereich von Dreheisen-Strommessern wird durch die Bemessung der Feldspule bestimmt. Eine *Meßbereichumschaltung* ist also nur durch Umschalten von Teilen der Feldspule unter Einhaltung der Amperewindungszahl zu erreichen. Daher kann der Strommeßbereich auch nicht mit außenliegenden Nebenwiderständen erweitert werden. — Das Erweitern des Spannungsmeßbereiches mit *Vorwiderständen* ist aber wie bei den Drehspulinstrumenten möglich.

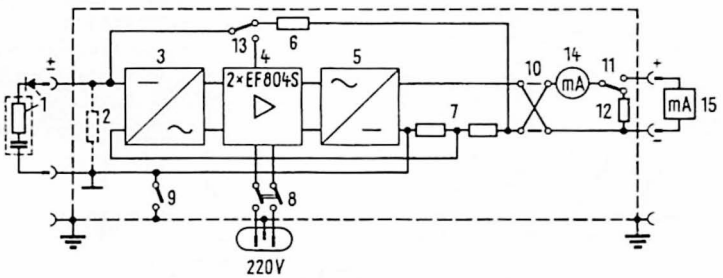
**Verstärker-Strom- und Spannungsmesser.** Verstärkergeräte für Gleichstrom sind das Vielbereich-Nanoamperemeter und der Einbereich-Gleichstromverstärker und für Gleichspannung das Vielbereich-Mikrovoltmeter und der Einbereich-Gleichspannungsverstärker. Die Geräte sind für betriebsmäßige Messungen sehr kleiner Gleichströme und Gleichspannungen bestimmt, für die man früher aufwendige Galvanometerschaltungen benötigte.

Die rasche und einfache Messung kleiner Gleichströme mit einer Meßtoleranz von 1,5% (unter 30 nA von 2,5%) ermöglicht das *Vielbereich-Nanoamperemeter* (Bild 76) mit seinen 13 Meßbereichen von 1 mA bis hinab zu 1 nA.

Bei ihm wird die vom Meßstrom am Eingangswiderstand hervorgerufene Gleichspannung von einem Zerhacker (vgl. Bild 77) nullpunktsicher in eine Wechselspannung umgeformt, diese dann von einem Röhrenverstärker verstärkt und von einem phasenempfindlichen Gleichrichter in einen proportionalen Gleichstrom zurückverwandelt. Dieser Ausgangsgleichstrom wird dem Anzeigeinstrument (2,5 mA), das ein spannbandgelagertes Drehspulmeßwerk hat, zugeleitet; er durchfließt einen als Bereichwähler dienenden Stromteiler, der einen bestimmten Bruchteil des Stromes für die Stabilisierung des Verstärkungsgrades auf den Eingang rückkoppelt. Der

Spannungsfall ist durch besondere Maßnahmen sehr niedrig gehalten (etwa 0,4 bis 2 mV), was beispielsweise für die Messung des Sperrstromes von Halbleitern wichtig ist.
Die angegebene Genauigkeit wird durch Schwankungen der Netzspannung und durch Röhrenalterung oder Röhrenwechsel nicht beeinflußt; es ist für die Messung nur zu beachten, daß der Quellenwiderstand etwa das 100fache des Eingangswiderstandes im jeweiligen Meßbereich betragen muß. Neben dem eingebauten Instrument kann noch ein zweites oder auch ein Linienschreiber angeschlossen werden.

Bild 76 Vielbereich-Nanoamperemeter




1 Meßspannungsquelle (Quellenwiderstand)
2 Eingangswiderstand
3 Zerhacker
4 Verstärker
5 Phasenempfindlicher Gleichrichter
6 Saugwiderstand, umschaltbarer Bereichswiderstand
7 Gegenkopplungswiderstand
8 Netzschalter
9 Erdungsschalter
10 Polwender
11 Schalter für äußeres Instrument
12 Ersatzbürde
13 Prüftaste
14 Drehspulinstrument
15 Äußeres Instrument

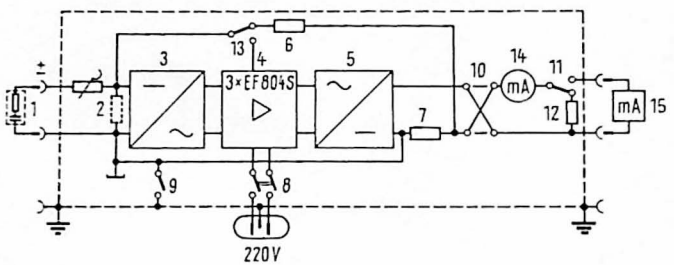
Bild 77 Vielbereich-Nanoamperemeter, Grundschaltung

*Einbereich-Gleichstromverstärker* sind jeweils für einen der Bereiche des Vielbereich-Nanoamperemeters fest ausgelegt und für den Anschluß eines außenliegenden Drehspulinstruments (2,5 mA bei 1000 bis 1500 Ω) bestimmt.

Das *Vielbereich-Mikrovoltmeter* ist das Gegenstück zum Vielbereich-Nanoamperemeter und ihm auch äußerlich sehr ähnlich (Bild 76). Es hat neun Meßbereiche für Gleichspannungen von 1 V bis 100 µV; die Meßtoleranz in den Bereichen 1 V bis 300 µV beträgt 1,5%, und im Bereich 100 µV ist sie 2,5%.

Die zu messende Spannung gelangt über einstellbare Vorwiderstände als Gleichstrom an den Zerhacker (vgl. Bild 78). Dort wird er in Wechselstrom umgeformt und dieser dann nach Verstärkung phasenrichtig in einen der Eingangsspannung proportionalen Ausgangsgleichstrom zurückverwandelt. Zur Anzeige wird ein Drehspulinstrument (2,5 mA) mit Spannbandlagerung verwendet.

Infolge der hohen Gegenkopplung besteht ein festes Übersetzungsverhältnis, das weitgehend vom Abschlußwiderstand unabhängig ist.




1 Meßspannungsquelle (Quellenwiderstand)
2 Eingangswiderstand und umschaltbarer Bereichswiderstand
3 Zerhacker
4 Verstärker
5 Phasenempfindlicher Gleichrichter
6 Saugwiderstand
7 Gegenkopplungswiderstand
8 Netzschalter
9 Erdungsschalter
10 Polwender
11 Schalter für äußeres Instrument
12 Ersatzbürde
13 Prüftaste
14 Drehspulinstrument
15 Äußeres Instrument

Bild 78 Vielbereich-Mikrovoltmeter, Grundschaltung

*Einbereich-Gleichspannungsverstärker* sind jeweils für einen der Bereiche des Vielbereich-Mikrovoltmeters ausgelegt. Sie sind für den Anschluß eines außenliegenden Drehspulinstruments (2,5 mA bei 1000 bis 1500 Ω) bestimmt.

**Galvanometer.** Wenn zur Messung sehr kleiner Ströme und Spannungen kalibrierte Drehspul-Strom- und -Spannungsmesser nicht mehr ausreichen und Meßverstärker nicht in Betracht kommen, verwendet man Galvanometer. Bei derartigen Messungen ist nämlich die Empfindlichkeit des Meßinstrumentes von ungleich größerer Bedeutung als die zu erzielende Genauigkeit. Galvanometer haben deshalb keine in Strom- oder Spannungswerten kalibrierte, sondern eine stromproportional unterteilte Skale, so daß das Instrument nicht mehr auf einen bestimmten Meßbereich und eine bestimmte zu erreichende kürzeste Einstellzeit festgelegt ist, sondern durch seine richtige Auswahl und sinngemäße Anwendung in der Schaltung den vorliegenden Meßverhältnissen weitgehend angepaßt werden kann.

Man unterscheidet Zeiger-, Lichtmarken- und Spiegelgalvanometer.

*Zeigergalvanometer* haben ebenso wie die Präzisionsinstrumente meist Messerzeiger, die, um ein kleines Trägheitsmoment zu erzielen, besonders leicht sind. Zur Verfeinerung des Abgleichens bei Brücken- und Kompensationsmessungen werden Nullgalvanometer ausgeführt, die neben der Hauptskale für den Grobabgleich noch eine kleine spiegelunterlegte Skale mit Ableselupe erhalten (Bild 79), wodurch beim Feinabgleich die Werte um Null mit erhöhter Empfindlichkeit genau abgelesen werden können.

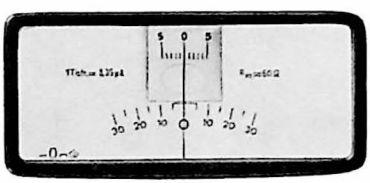



Bild 79
Skalenausführung des Zeiger-Nullgalvanometers Form Z

*Lichtmarken-Galvanometer* (Strahlengang s. S. 62) haben wegen ihres gewichtslosen Licht-Zeigers ein noch kleineres Trägheitsmoment als Zeigergalvanometer und kommen in der Meßempfindlichkeit den Spiegelgalvanometern nahe. Infolge der fest eingebauten Optik gleichen sie hinsichtlich schneller Gebrauchsbereitschaft Präzisions-Zeigerinstrumenten.

Um den Reibungsfehler auszuschalten, ist das Meßorgan zwischen gespannten Bändern federnd aufgehängt, und um es vor Beschädigungen durch Stöße oder Erschütterungen beim Transport des Galvanometers zu schützen, ist es durch sogenannte Abfänger in seiner axialen und seitlichen

Bewegung begrenzt (Spannbandlagerung). Darüber hinaus kann die Drehspule durch Kurzschließen über einen Schalter elektrisch arretiert werden.

*Spiegelgalvanometer* verwendet man, wenn größte elektrische Empfindlichkeit verlangt wird. Sie haben ebenfalls einen Lichtzeiger, jedoch meist von vielfach größerer Länge (normalerweise 1,5 m) als Lichtmarken-Galvanometer, so daß bereits eine ganz geringe Drehung des Meßorgans einen meßbaren Ausschlag auf der Skale hervorruft. Da bei dieser großen Zeigerlänge ein Einbau der Optik in das Instrument zu aufwendig ist, werden besondere Ablesevorrichtungen benötigt.

Um hohen Anforderungen an Meßsicherheit und Störungsfreiheit zu genügen, sind Spiegelgalvanometer so gebaut, daß Nachwirkungserscheinungen an Spulen und Bändern sowie Thermospannungen und Erschütterungen die Nullpunktsicherheit so wenig wie möglich beeinflussen. Bild 80 zeigt zwei Ausführungsbeispiele neuzeitlicher Spiegelgalvanometer. Tiefe Schwerpunktlage und großer Fußabstand verleihen ihnen eine gute Standfestigkeit. An verstellbaren Füßen können sie nach einer eingebauten Libelle in der Vertikallage ausgerichtet werden. Das Standardgalvanometer für allgemeine Messungen, das auch als tragbares Gerät geeignet ist, braucht man aber nicht genau auszurichten, da seine Drehspule nicht wie die Doppelspule des Supergalvanometers frei,

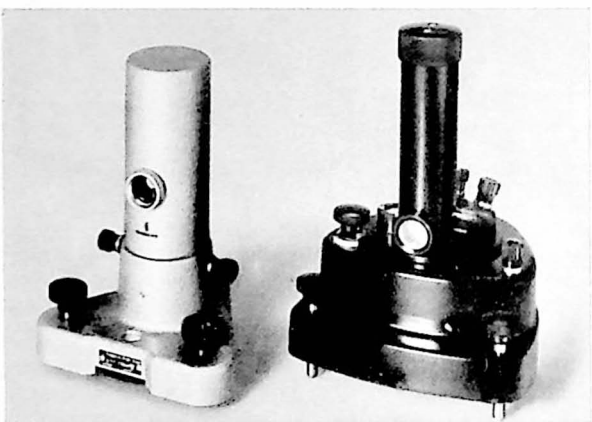


Bild 80

Neuzeitliche Spiegelgalvanometer

Standardgalvanometer, Doppelspul-Supergalvanometer

sondern zwischen gespannten Bändern hängt. Mit sicher wirkender Nullageeinstellung läßt sich die Nullage jeweils an die gewünschte Stelle der Skale verschieben. Besonders unempfindlich gegen Erschütterungen ist das Standardgalvanometer durch die mechanische Dämpfung seines beweglichen Organs: Das Spannband wird durch einen Drahtring geführt, der mit einem Tropfen Silikonöl gefüllt ist.

Zum Ablesen der Lichtzeigerausschläge werden meist *objektive Ablesevorrichtungen* benutzt. Der Lichtstrahl eines Lämpchens oder eine Ableselaterne wird auf den Spiegel des Galvanometers geworfen und von dort auf die Skale reflektiert, auf der ein heller Lichtstreifen oder ein Lichtfleck mit einem feinen Ablesestrich als Ablesemarke entsteht. Doppelbilder vermeidet man entweder durch ein Meniskusfenster mit Vorsatzlinse (beim Doppelspul-Galvanometer) oder durch eine Konkav-Konvexlinse (positiver Meniskus). Die Skalen sind meist als Transparentskalen ausgeführt, damit sie wahlweise als Durchsicht- oder Aufsichtskale benutzt werden können.

Bild 81 zeigt die tragbare Ablesevorrichtung für das Standardgalvanometer, das hierbei eine Linse von 33,3 cm Brennweite, entsprechend der von den Distanzschienen bestimmten Lichtzeigerlänge, haben muß. Da die Skale im Radius der Lichtzeigerlänge gebogen ist, ist ihre Teilung proportional dem Ausschlagswinkel. Sie hat den Nullpunkt am Ende des ersten Skalenviertels. Das Galvanometer kann also ohne Skalenwechsel für Null- und für Ausschlagsmessungen benutzt werden. Als Lichtmarke

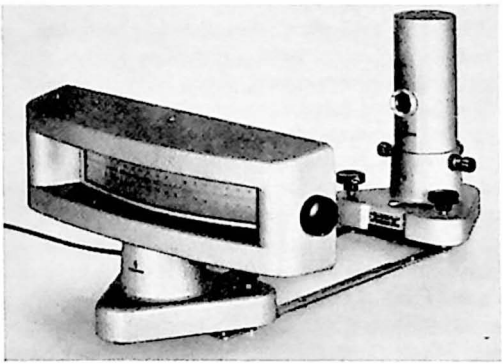


Bild 81
Standardgalvanometer mit tragbarer Ablesevorrichtung

dient das Bild des Glühfadens eines in Skalenhöhe eingebauten Lämpchens, das mit Hilfe eines Drehknopfes (s. Bild) leicht ausgerichtet werden kann.

Ortsfeste Lichtzeiger-Ablesevorrichtungen werden normalerweise für 150 cm Lichtzeigerlänge ausgeführt (Galvanometerlinse mit 150 cm Brennweite). Ihre Skalen erhalten je nach Wunsch den Nullpunkt links, am Ende des ersten Fünftels oder in der Mitte. Die Vorrichtungen sind aus Einzelbauteilen so zusammensetzbar, daß sie sowohl in horizontaler Anordnung (Bild 82) auf einem Tisch aufgestellt als auch in vertikaler Anordnung (Bild 83) an der Wand befestigt werden können. Das Galvanometer ist in jedem Fall auf einem Wandarm oder auf einem massiven Sockel stoß- und erschütterungsfrei aufzustellen. Die Wandarme sind in zwei Ausführungen erhältlich. Die einfachere hat nur Isolier-

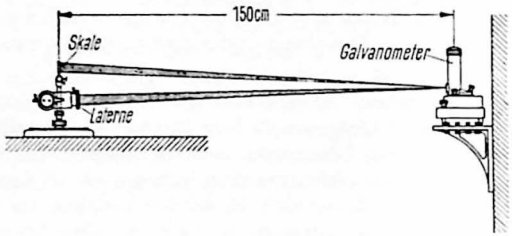



Bild 82 Ortsfeste Lichtzeiger-Ablesevorrichtung in horizontaler Anordnung (mit Doppelspul-Supergalvanometer)

schienen, auf die das Galvanometer standfest aufgestellt werden kann, die andere hat zusätzlich eine Schirmplatte, die, vom Wandarm isoliert, die Isolierschienen trägt. In beiden Fällen sind die Anschlußklemmen geschirmt. Galvanometer, deren Meßwerk vom Gehäuse isoliert ist, so daß dieses zur Abschirmung verwendet werden kann (z. B. Doppelspul-Supergalvanometer), lassen sich auf dem einfacheren Wandarm kriechstromfrei aufstellen. Ist das Meßwerk nicht vom Gehäuse isoliert, wie bei den Standardgalvanometern für allgemeine Verwendung, so ist zum kriechstromfreien Aufstellen der Wandarm mit zusätzlicher Schirmplatte erforderlich.

Bei den *subjektiven Ablesevorrichtungen*, die nur noch selten in Gebrauch sind, beobachtet man das Spiegelbild der beleuchteten Skale im Galvanometerspiegel durch ein Fernrohr mit Fadenkreuz. Bei erreichtem Ausschlag gibt der mit dem Fadenkreuz zur Deckung kommende Skalenteilstrich den Ausschlagswert an. Damit die Skalenziffern trotz der Spiege-

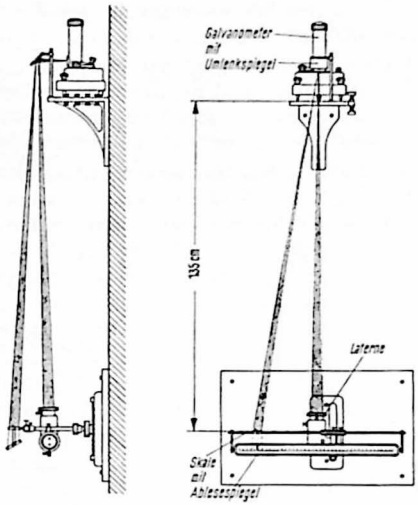



Bild 83
Ortsfeste Lichtzeiger-Ablesevorrichtung in vertikaler Anordnung (mit Doppelspul-Supergalvanometer)

lung richtig zu lesen sind, ist die Skalenbeschriftung in Spiegelschrift ausgeführt. Das Galvanometer hat ein Meniskusfenster.

In Tafel 49 sind die festgelegten Begriffe für Messungen mit Galvanometern und Instrumenten großer Empfindlichkeit erläutert. Die Tafeln 50 bis 53 enthalten Zusammenstellungen von Daten und Hauptanwendungsgebieten gebräuchlicher Galvanometer sowie kombinierter und Vielbereich-Lichtmarken-Instrumente. Zu beachten ist, daß die Werte für $R_a$ in den Tafeln 50 und 53 und demgemäß auch die für $C_u$ und $C_{ub}$ um etwa $\pm 10\%$ schwanken können; die auf den gelieferten Instrumenten angegebenen Werte sind jedoch mit einer Toleranz von $\pm 5\%$ festgelegt. Für den Galvanometerbereich der kombinierten Lichtmarken-Instrumente stimmen die Angaben für $R_a$ in Tafel 51 dagegen bereits bis auf $\pm 5\%$.

Weil Galvanometer keine eigene Dämpfung durch eingebaute Nebenwiderstände haben, ist man auf die Dämpfung angewiesen, die durch den angeschlossenen äußeren Stromkreis entsteht. Zur *Beurteilung eines Galvanometers auf seine Verwendbarkeit für bestimmte Meßaufgaben* muß deshalb neben seiner elektrischen Empfindlichkeit auch der Meßschaltungswiderstand $R_M$ bekannt sein, über den das Meßwerk geschlossen wird, weil von der

Größe dieses Widerstandes die Art der Einstellung, ob kriechend oder gedämpft schwingend, und damit die Beruhigungszeit $T_B$ abhängen. Zur raschen Durchführung der Messungen ist es vorteilhaft, wenn dieser Widerstand so groß ist, daß sich die Drehspule mit möglichst geringer Überschwingung in ihre Endlage einstellt. Der Meßschaltungswiderstand, bei dem dies eintritt, wird als äußerer Grenzwiderstand $R_a$ bezeichnet.

Die Lichtmarken-Instrumente mit Galvanometerbereich haben infolge der eingebauten Widerstandskombination schon eine gewisse Eigendämpfung, abgesehen von der besonders gegen Erschütterungen wirksamen Ölringdämpfung. Ihre Einstellung ist deshalb in geringerem Maße von der Dämpfung durch den Meßschaltungswiderstand abhängig, d.h., ihr Meßwerk ist noch gut gedämpft, wenn der bei ihnen angegebene zulässige Meßschaltungs-Widerstandsbereich $R_{Mz}$ eingehalten wird.

Die Angabe des äußeren Grenzwiderstandes $R_a$ oder des zulässigen Meßschaltungs-Widerstandsbereiches $R_{Mz}$ auf dem Instrument besagt nicht, daß diese Werte unbedingt eingehalten werden müssen; denn wenn eine langsamere Änderung des Meßvorganges größere Beruhigungszeiten zuläßt oder bei Serienmessungen infolge Festlegung eines Toleranzbereiches das genaue Ablesen der Einzelwerte nicht erforderlich ist, kann man auch ohne weiteres mit abweichenden Meßschaltungswiderständen arbeiten. Im übrigen kann bei Galvanometern in allen Fällen, in denen der Meßschaltungswiderstand kleiner als der äußere Grenzwiderstand ist ($R_M < R_a$), die Dämpfung elektrisch (mit Vorwiderstand) oder magnetisch (bei Spiegelgalvanometern mit eingebautem magnetischem Nebenanschluß) angepaßt werden. Die elektrische Dämpfungsanpassung empfiehlt sich besonders bei Strommessungen, weil beim Erhöhen des Meßschaltungswiderstandes durch einen entsprechenden Vorwiderstand die volle Stromempfindlichkeit erhalten bleibt und nicht wie bei der magnetischen Dämpfungsanpassung mit schwächerem Feld abnimmt. Bei Spannungsmessungen ist dagegen die magnetische Dämpfungsanpassung angebracht, mit der die größte Spannungsempfindlichkeit erreicht wird.

Nach der Auswahl des Galvanometers muß man seine *Empfindlichkeit den Meßanforderungen anpassen.*

Bei Brücken- und Kompensationsmessungen handelt es sich meist nur darum, die Empfindlichkeit für die orientierende Messung, also für die Grobeinstellung, so weit herabzusetzen, daß Überlastungen des Instrumentes vermieden werden. Man schaltet dazu bei Brückenmessungen einen Vorwiderstand oder Spannungsteiler vor die Meßbatterie. Bei Kompensationsmessungen wird ein Vorwiderstand vor das Instrument

**Tafel 49** Begriffe für Messungen mit Galvanometern sowie empfindlichen Strom- und Spannungsmessern

| Formelzeichen | Bezeichnung und Bedeutung |
|---|---|
| $R_{kl}$ | Klemmenwiderstand eines Instrumentes |
| $R_M$ | Meßschaltungswiderstand: Widerstand des äußeren Stromkreises (von den Instrumentklemmen aus gesehen) |
| $R_d$ | Dämpfungswiderstand: Summe aus $R_{kl}$ und $R_M$ ($R_d = R_{kl} + R_M$) |
| | *Galvanometer* |
| $R_a$ | Äußerer Grenzwiderstand: Widerstand des äußeren Stromkreises, bei dem die Dämpfung aperiodische Einstellung hervorruft, der Zeiger sich also, ohne überzuschwingen, in kürzester Zeit auf den Meßwert einstellt. Das entspricht DIN 1319, wonach $R_a$ der Widerstand ist, bei dem der schwingende Ausschlag in den nichtschwingenden übergeht |
| $R_0$ | Gesamtwiderstand für aperiodische Einstellung: Summe aus Klemmenwiderstand und äußerem Grenzwiderstand ($R_0 = R_{kl} + R_a$) |
| $C_i$ | Stromkonstante in $A/\frac{mm}{m}$: Strom, der 1 mm Zeigerausschlag bei 1 m Skalenabstand hervorruft. $C_i$ mal Zeigerausschlag in mm/m ergibt also den zu messenden Strom in A[1]) |
| $C_u$ | Spannungskonstante: Spannung (EMK) an einem Kreis mit dem Gesamtwiderstand $R_0$, die 1 mm Zeigerausschlag bei 1 m Skalenabstand hervorruft[1]). $C_u = C_i R_0$ |
| $C_b$ | Ballistische Konstante: Elektrizitätsmenge, die bei völlig ungedämpftem Meßwerk einen ballistischen Zeigerausschlag von 1 mm bei 1 m Skalenabstand hervorruft[1]). Ballistische Stromkonstante $C_{ib} = 2{,}72\, C_b$ und Ballistische Spannungskonstante $C_{ub} = 2{,}72\, C_b\, R_0$ werden auf entsprechenden Zeigerausschlag bei aperiodisch gedämpftem Meßwerk bezogen |
| $C_{u\,Fl}$ | Fluxmetrische Konstante: Spannungsimpuls, der bei stark gedämpftem Meßwerk einen fluxmetrischen Ausschlag von 1 mm bei 1 m Skalenabstand hervorruft |
| $T_h$ | Halbwertzeit: Zeit, in der ein fluxmetrischer Ausschlag auf die Hälfte abgeklungen ist |
| | *Strommesser und Spannungsmesser* |
| $R_{Mz}$ | Zulässiger Meßschaltungs-Widerstandsbereich: Widerstandsbereich des äußeren Stromkreises, in dem die Überschwingung $\ddot{U}_1$ max. 10% und die Beruhigungszeit $T_B$ max. $1 \cdot T_0$ s beträgt |
| | *Werte, die den Einstellvorgang charakterisieren* |
| $T_0$ | Schwingungsdauer des ungedämpften Meßwerks für eine volle Periode |
| $T_B$ | Beruhigungszeit: Zeit, in der die endgültige Einstellung auf einen 2/3 Skalenlänge entsprechenden Meßwert bis auf eine Einstelltoleranz von $\pm 1{,}5\%$ der Skalenlänge erreicht wird |
| $n_{ü}$ | Anzahl der während $T_B$ beobachteten Halbschwingungen |
| $\ddot{U}_1$ | Überschwingung: Amplitude der ersten Halbschwingung über einen 2/3 der Skale entsprechenden Meßwert in % des Skalenendwertes |

[1]) Bei Lichtmarken- und Zeigergalvanometern wird die Konstante auf 1 Teilstrich Zeigerausschlag bezogen.

**Tafel 50** Auswahl von Zeiger- und Lichtmarken-Galvanometern

| Galvanometer-Konstanten | | | | | Anwendung in Laboratorien, Werkstätten und auf der Strecke bei Nullmesssungen mit Meßbrücken: normalempfindlich | Nullmesssungen mit Meßbrücken: hochempfindlich | Nullmesssungen mit Kompensatoren: technische Kompens. | Nullmesssungen mit Kompensatoren: Präzisions-Kompens. | hochempfindlichen Ausschlagsmessungen von: Gleichströmen | Gleichspannungen | Wechselströmen und ihren Komponenten über Gleichrichter | Thermospannungen und hochfrequenten Wechselströmen über Thermoumformer | Isolationswiderständen | Kapazitäten (Stromstoß) | Magnetfeldern (mit Tauchspulen) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $C_i$ | $R_{kl}$ | $R_a$ | $C_b$ | $T_0$ | | | | | | | | | | | |
| A/Tlstr. etwa | Ω etwa | Ω etwa | C/Tlstr. etwa | s etwa | | | | | | | | | | | |
| *Zeiger-Nullgalvanometer*[1]) | | | | | | | | | | | | | | | |
| $0{,}7 \cdot 10^{-6}$ | 20 | 40 bis ∞ | — | 3 | ● | | | | | | | | | | |
| $0{,}9 \cdot 10^{-6}$ | 20 | 20 bis ∞ | — | 3 | ● | | | | | | | | | | |
| $0{,}35 \cdot 10^{-6}$ | 60 | 100 bis ∞ | — | 3 | ● | | ● | | | | | | | | |
| $0{,}1 \cdot 10^{-6}$ | 400 | 1000 bis ∞ | — | 3 | ● | | | | | | | | | | |
| *Lichtmarken-Galvanometer, Nullpunkt seitlich oder Mitte (150 Tlstr.)* | | | | | | | | | | | | | | | |
| $1{,}5 \cdot 10^{-9}$ | 4000 | 100000 | $3 \cdot 10^{-9}$ | 5 | | | | | ●[2]) | | ● | | ●[3]) | ●[3]) | |
| $4 \cdot 10^{-9}$ | 750 | 15000 | $7 \cdot 10^{-9}$ | 4 | | | ● | ● | ●[2]) | | ● | | ●[3]) | ●[3]) | |
| $15 \cdot 10^{-9}$ | 70 | 1000 | $30 \cdot 10^{-9}$ | 4 | | ● | ● | ● | ●[2]) | ●[2]) | ● | ● | | | |
| $50 \cdot 10^{-9}$ | 14 | 100 | $130 \cdot 10^{-9}$ | 4 | | ● | | | | ● | ● | ● | | | ● |
| $150 \cdot 10^{-9}$ | 9 | 10 | $250 \cdot 10^{-9}$ | 4 | | | | | | ● | | | | | ● |
| *Doppelspul-Lichtmarken-Galvanometer mit nieder- und hochohmiger Spule, Skale 30-0-120* | | | | | | | | | | | | | | | |
| $20 \cdot 10^{-9}$ | 105 | 350 | — | 5,5 | | ● | ● | ● | | ● | | ● | | | ● |
| $1{,}7 \cdot 10^{-9}$ | 3200 | 57000 | $4 \cdot 10^{-9}$ | 5,5 | | | | | ● | | ● | | ●[3]) | ●[3]) | |
| *Doppelspul-Lichtmarken-Galvanometer mit galvanisch getrennten gleichen Systemen, Nullpunkt Mitte* | | | | | | | | | | | | | | | |
| $20 \cdot 10^{-9}$ | 50 | 450 | — | 5 | | ●[4]) | ●[4]) | ●[4]) | | | ●[4]) | ●[4]) | | | |
| $20 \cdot 10^{-9}$ | 50 | 450 | — | 5 | | | | | | | | | | | |

[1]) Instrument hat Ableselupe zum genauen Ablesen der Werte um Null.
[2]) Nebenwiderstand nach Bild 84 *B* steht zur Verfügung.
[3]) Verwendbar mit der MΩ-µF-Meßeinrichtung nach Bild 85.
[4]) Ein System für sich allein angeschlossen. Spezielle Verwendungen: Bei Anschluß beider Systeme (wobei $R_a$ je 900 Ω) Differenzmessungen.

**Tafel 51** Auswahl von kombinierten Lichtmarken-Instrumenten

| Skalen-Teilstriche | Instrumentdaten: als Galvanometer | | | als Stromesser | | | als Spannungsmesser | | | Anwendung |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $C_i$ | $R_{kl}$ | $R_a$ | Meßbereich | $R_{kl}$ | $R_{Mz}$ [1] | Meßbereich | $R_{kl}$ | $R_{Mz}$ [1] | |
| | µA/Tlstr. | Ω | Ω etwa | µA | Ω | Ω | mV | Ω | Ω | |
| 150 | 1,6 | 4000 | 80000 | 0,3 | 30000 | 60000 bis 400000 | 30 | 100000 | 0 bis 200000 | Als Ausschlagsgalvanometer je nach $R_a$ wie entsprechende Lichtmarken-Galvanometer (vgl. Tafel 50). Als Strom- und Spannungsmesser für Messungen mit ±0,5% Anzeigetoleranz bei weitgehender Freiheit der Schaltmöglichkeiten infolge des großen $R_{Mz}$: für kleine Gleichströme und -spannungen; bei niedrigem $R_a$ bzw. $R_{Mz}$ für Thermospannungen, hochfrequente Wechselspannungen (über Thermoumformer), lichtelektrische Messungen (über Fotozellen); bei höherem $R_a$ bzw. $R_{Mz}$ für Isolationsströme |
| 150 | 9 | 750 | 7000 | 1 | 3000 | 6000 bis 30000 | 10 | 10000 | 0 bis 15000 | |
| 150 | 16 | 70 | 750 | 3 | 300 | 600 bis 4000 | 3 | 1000 | 0 bis 2500 | |
| 100 | 90 | 14 | 80 | 10 | 30 | 60 bis 200 | 1 | 100 | 0 bis 140 | |
| 150 [2] | 150 | 9 | 8 | 30 | 10 | 2,5 bis 25 | 0,3 | 10 | 2,5 bis 25 | |

**Tafel 52** Auswahl von Vielbereich-Lichtmarken-Instrumenten

| Skalen-Teilstriche | Instrumentdaten: Meßbereiche | Spannungsabfall oder Stromaufnahme | $R_{Mz}$ | Anwendung |
|---|---|---|---|---|
| 100 u. 150 | 1 – 10 – 100 µA<br>3 – 30 µA | bei 1 µA: etwa 3 mV, bei 3 bis 100 µA: 8 bis 11 mV | bei 1 µA: 20 kΩ bis ∞, bei 3 bis 100 µA 0 Ω bis ∞ | Als Strom- sowie Spannungsmesser zum Messen kleiner Gleichströme und -spannungen mit ±0,5% Anzeigetoleranz bei fast völliger Unabhängigkeit vom Meßschaltungswiderstand. Das 12-Bereich-Instrument ist wegen der kurzen Beruhigungszeit ($T_B$ = 0,9 bis 1,8 s) besonders für rasche Messungen geeignet |
| 150 | 15 – 75 – 300 µA –<br>1,5 – 7,5 – 30 mA u.<br>0,75 – 3 – 15 mV –<br>0,075 – 0,3 – 1,5 V | 0,26 bis 1,6 mV<br>15 µA | bei 15 µA: 40 Ω bis ∞, bei allen anderen Meßbereichen: 0 Ω bis ∞ | |

[1]) $T_B$ = 3 bis 4 s. [2]) Für dieses Instrument werden Thermoumformer mit Vorwiderständen für 0,45 bis 2400 V ausgeführt.

**Tafel 53** Auswahl von Spiegelgalvanometern

| Galvanometer-Konstanten | | | | | Anwendung |
|---|---|---|---|---|---|
| $C_i$ | $R_{kl}$ | $R_a$ | $C_b$ | $T_0$ | |
| A/$\frac{mm}{m}$ etwa | Ω etwa | Ω etwa | C/$\frac{mm}{m}$ etwa | s etwa | in Laboratorien, Werkstätten und auf der Strecke bei |
| *Standardgalvanometer* | | | | | |
| 0,5 bis 0,6 · $10^{-9}$ | 2800[1]) | 200000 bis 120000 | — | 2,8 | hochempf. Strommessg., Isolationsmessg. |
| 1,8 bis 2,5 · $10^{-9}$ | 400[1]) | 15000 bis 9000 | — | 2,8 | hochempfindlichen Strommessungen |
| 20 bis 25 · $10^{-9}$ | 15[2]) | 60 bis 25 | — | 3 | hochempfindlichen Spannungsmessungen |
| 5,5 bis 7 · $10^{-9}$ | 40 | 500 bis 300 | — | 4 | Präzis.-Meßbrücken und Kompensatoren |
| 9 bis 12 · $10^{-9}$ | 20[2]) | 130 bis 80 | — | 4,3 | Präzis.-Meßbrücken und Kompensatoren |
| 0,07 bis 0,09 · $10^{-9}$ | 2800[1]) | 500000 bis 350000 | 0,06 bis 0,08 · $10^{-9}$ | 6 | hochempf. Strommessg., Isolations- u. Kapazitäts-Messungen, ballistischen u. fluxmetrischen Messungen kürzerer Ablaufdauer |
| 0,10 bis 0,13 · $10^{-9}$ | 2800[3]) | 300000 bis 200000 | 0,09 bis 0,12 · $10^{-9}$ | 6 | hochempf. Strommessg., Isolations- u. Kapazitäts-Messungen, ballistischen u. fluxmetrischen Messungen kürzerer Ablaufdauer |
| | | | | | in Schulen für Demonstrationszwecke (Spiegeldurchmesser 20 mm) bei |
| 0,5 · $10^{-9}$ | 2800 | 200000 | — | 3 | hochempf. Strommessg., Isolationsmessg. |
| 1,3 · $10^{-9}$ | 400 | 20000 | — | 3 | hochempf. Strommessung., Kompensatoren |
| 9 · $10^{-9}$ | 40 | 500 | — | 3 | hochempfindl. Spannungsmessungen, Meßbrücken und Kompensatoren |
| 20 · $10^{-9}$ | 15 | 50 | — | 3,2 | hochempfindl. Spannungsmessungen, Meßbrücken und Kompensatoren |
| *Schnellschwinger* | | | | | |
| 36 bis 62 · $10^{-9}$ | 40 ±1% | 80 bis 5 | — | 0,4 | bei schnell veränderlichen Vorgängen u. Serienmessungen |
| *Ballistische Galvanometer* | | | | | |
| 0,5 bis 1,8 · $10^{-9}$ | 60 ±1% | 7000 bis 550 | 1 bis 3,5 · $10^{-9}$ | 12 | bei ballistischen Messungen längerer Ablaufdauer |
| *Supergalvanometer mit nieder- und hochohmiger Doppelspule* | | | | | bei höchstempf. Strom- und Spannungsmessg., Isolations- und Kapazitätsmessg., ballistischen Messg., fluxmetrischen[4]) Messg., Meßbrücken und Kompensatoren |
| 1 bis 4 · $10^{-9}$ | 17[2]) | 300 bis 1 | 1,4 bis 6 · $10^{-9}$ | 9 | |
| 0,07 bis 0,3 · $10^{-9}$ | 450[1]) | 60000 bis 2500 | 0,1 bis 0,4 · $10^{-9}$ | | |

[1]) Nebenwiderstand nach Bild 84 *A* steht zur Verfügung. [3]) Verwendbar mit der MΩ-μF-Meßeinrichtung nach Bild 85.

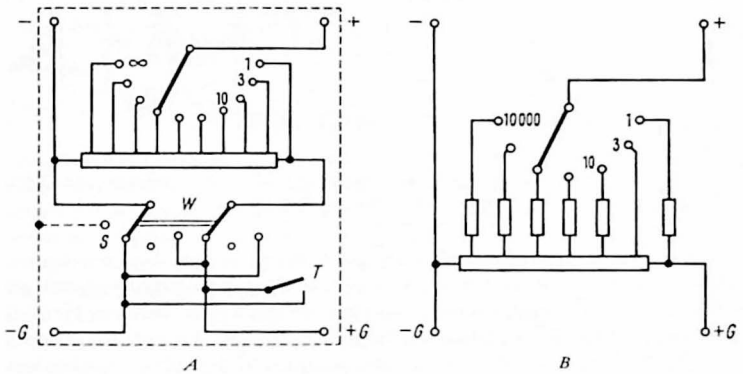
[2]) Nebenwiderstand nach Bild 86 steht zur Verfügung. [4]) $C_{u\,Fl} = 12 \cdot 10^{-6}$ Vs/$\frac{mm}{m}$, $T_h$ etwa 3 min (hochohm. Spule).

geschaltet und damit eine größere Spannungskonstante $C_u$ eingestellt, also der Spannungsmeßbereich vergrößert.

Für direkte Strom- und Spannungsmessungen werden umschaltbare Nebenwiderstände benötigt, die es ermöglichen, andere Stromkonstanten $C_i$ oder andere Spannungskonstanten $C_u$ einzustellen und damit die Meßbereiche der Galvanometer erheblich zu erweitern.

In hochohmigen Stromkreisen (eingeprägter Strom) benutzt man hierzu, wenn man ein in Tafel 53 gekennzeichnetes Spiegelgalvanometer verwendet, hochisolierte und geschirmte Nebenwiderstände in Ayrtonschaltung (Bild 84 *A*). Mit Hilfe eines in jeden Widerstand eingebauten Drehschalters lassen sich verschiedene Empfindlichkeitsstufen einstellen (jede Drehschalterstellung ist mit dem Faktor versehen, mit dem die Stromkonstante $C_i$ der Anordnung multipliziert werden muß). Damit bei allen Schalterstellungen die Dämpfung des Galvanometers nahezu gleichbleibt, ist es erforderlich, daß der Meßschaltungswiderstand $R_M$ um ein Mehrfaches größer als der Nebenwiderstand ist.

Ähnliche Nebenwiderstände (Bild 84 *B*) werden auch für einige in Tafel 50 gekennzeichnete Lichtmarken-Galvanometer zum Vergrößern der Strom-




*S* Schirmklemme
*T* Kurzschlußtaste (zum Dämpfen der Galvanometerschwingungen)
*W* Stromwender

Bild 84 Nebenwiderstände in Ayrtonschaltung für hochohmige Stromkreise. Ausführungen: *A* für Spiegelgalvanometer, *B* für Lichtmarken-Galvanometer

und Spannungskonstanten gebaut. Ihre Innenschaltung ist auf konstanten Eingangswiderstand ergänzt, so daß unabhängig von der Schalterstellung die Stromquelle stets mit dem gleichen Widerstand belastet ist. Nur bei der Drehschalterstellung „1" muß ein angegebener Mindest-Meßkreiswiderstand von etwa dem doppelten Wert des Nebenwiderstandes eingehalten werden, wenn eine kriechende Einstellung vermieden werden soll. Von der nächsten Stufe an kann dann mit beliebigen Meßkreiswiderständen von 0 bis ∞ gearbeitet werden.

Isolations- und Kapazitätsmessungen (s. S. 220), beispielsweise bei Kabeluntersuchungen, werden zweckmäßigerweise mit der MΩ-μF-Meßeinrichtung nach Bild 85 ausgeführt. Sowohl der Isolationswiderstand als auch

*M* Meßartwähler
*MT* Meßtaste
*GT* Galvanometer-(Kurzschluß-) Taste
$R_N$ Normalwiderstand
$C_N$ Normalkondensator
$C_{Na}$ äußerer Normalkondensator
$R_x$ zu messender Isolationswiderstand
$C_x$ zu messende Kapazität

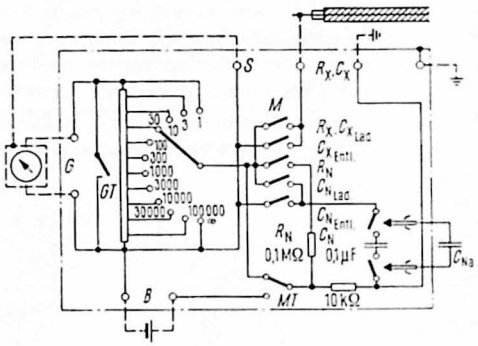



Bild 85 MΩ-μF-Meßeinrichtung für Isolations- und Kapazitätsmessungen mit Lichtmarken- oder Spiegelgalvanometer

die Kapazität eines Kabels läßt sich durch Vergleich mit den eingebauten Normalien (0,1 MΩ und 0,1 μF) ermitteln. Der Kapazitätsvergleich als Ladungs- oder Entladungsmessung ist auch mit einem äußeren Normal ausführbar. Mit einem Meßartwähler kann man ohne Ändern der äußeren Schaltung von einer Meßart auf die andere und zwischen Vergleichen (bei Eichbehörden auch Eichen) und Messen umschalten. Die Meßeinrichtung wird für Lichtmarken-Galvanometer mit den Meßbereichen von 10 kΩ bis 0,3 TΩ und von etwa 750 pF bis 11 μF sowie für Spiegelgalvanometer mit den Meßbereichen 25 kΩ bis 4 TΩ und 1000 pF bis 12 μF ausgeführt.

In niederohmigen Stromkreisen benutzt man Nebenwiderstände in Volkmannschaltung (Bild 86), bei denen in allen Drehschalterstellungen der Ein- und Ausgangswiderstand und damit die Dämpfung des Galvanometers konstant bleiben. Sie werden daher besonders bei ballistischen Messungen verwendet. Jede Schalterstellung ist wieder mit dem Faktor versehen, mit dem die Strom- und Spannungskonstanten des Galvanometers zu multiplizieren sind. Der Nebenwiderstand kann nur für bestimmte Galvanometer und Meßkreiswiderstände ausgeführt werden (vgl. Tafel 53).

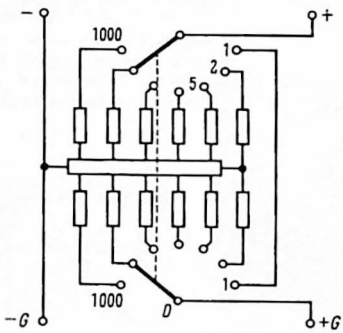



Bild 86
Nebenwiderstand in Volkmannschaltung für niederohmige Stromkreise, Grundschaltung (Ausführung für Supergalvanometer ist geschirmt und hat Stromwender sowie Dämpfungstaste)

## Leistungslose Spannungsmessung

Damit beim Untersuchen energiearmer Spannungsquellen die Spannung nicht durch eine Energieentnahme unzulässig abfällt, wendet man die leistungslose Spannungsmessung an. Beim vergleichenden Messen und amtlichen Eichen ist sie erforderlich, weil dabei die zu messende Spannung in einem Vergleichsverfahren auf ein Normalmaß (Spannung des Normalelementes) bezogen wird, das nicht belastet werden darf. Je nach der geforderten Genauigkeit und der gewünschten Schnelligkeit der Messungen sowie dem vertretbaren Aufwand kommen direkte Meßverfahren (mit Anzeigeinstrumenten geringsten Energieverbrauches; s. S. 134 sowie auch S. 51 und 52, tragbare Betriebsinstrumente) oder Kompensationsverfahren in Betracht.

**Lichtmarken-Universalelektrometer.** Für die rasche und praktisch verlustlose Spannungsmessung an Stromquellen aller Art eignen sich

Lichtmarken-Universalelektrometer, die als elektrostatische Instrumente für Gleich- und Wechselspannung bis 20 kHz, in Sonderausführung bis 6 MHz, verwendbar sind. Ihr Eigenverbrauch ist außerordentlich gering. Bei Gleichspannung entziehen sie der Stromquelle nur die zur Aufladung erforderliche Elektrizitätsmenge, bei Wechselspannung entnehmen sie ihr infolge geringer Eigenkapazität lediglich etwas Blindleistung (bei 20 kHz und Endausschlag je nach Meßbereich 0,6 bis 75 mVA). Lichtmarken-Universalelektrometer zeigen unabhängig von der Kurvenform Effektivwerte an. Die Instrumente sind besonders zum Messen von Gleichspannungen an Glimmstrecken, von Gitterspannungen an Verstärkern sowie zum Messen extrem hoher Widerstandswerte (vgl. S. 206) zu empfehlen.

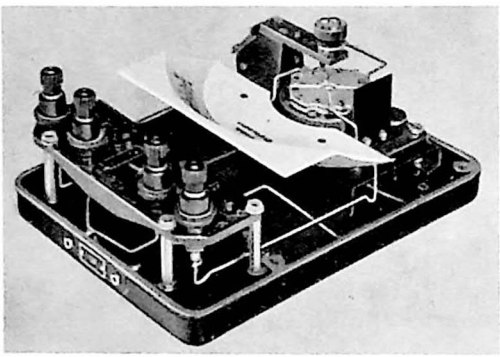


Bild 87
Aufbau des Lichtmarken-Universalelektrometers

Das Meßwerk (s. Bild 87) ist das eines Quadrantenelektrometers (s. S. 43); die elektrischen Ladungen auf den beiden „Quadrantenpaaren" üben auf die „Nadel" eine der Ladungsdichte entsprechende Kraft aus. Die Nullage der zwischen Spannbändern gelagerten Nadel läßt sich mit dem oben angeordneten Torsionskopf einstellen. Gegen den Einfluß elektrostatischer Fremdfelder ist das Meßwerk abgeschirmt, mit Bernstein ist es hoch isoliert. Zum Schutz des Meßwerks sind vor die Nadel und vor ein Quadrantenpaar Widerstände von je 20 kΩ gelegt.

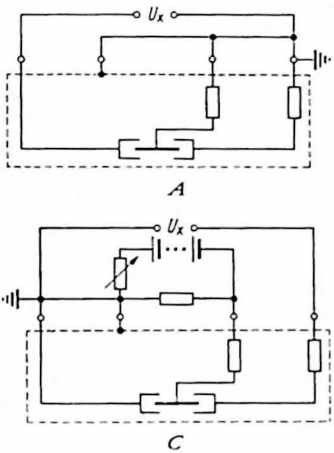
Das Meßprinzip läßt das Arbeiten mit drei Schaltungen zu.

Bei der *idiostatischen Schaltung* (Bild 88*A*) liegt die Meßspannung zwischen dem einen mit der Nadel verbundenen Quadrantenpaar und dem anderen

Quadrantenpaar. Die Meßwerte kann man an einer quadratisch verlaufenden, in Volt geeichten Skale ablesen.

Bei der *Nadelschaltung* (Bild 88*B*) werden die beiden Quadrantenpaare mit einer Hilfsspannung auf entgegengesetzt gleiches Potential gebracht. Die Meßspannung liegt zwischen dem geerdeten Symmetriepunkt und der Nadel. Für diese Schaltung ist eine ungeeichte 100teilige (lineare) Skale vorgesehen. Der Auschlag ist in einem großen Bereich der Hilfsspannung proportional der Meßspannung.

Bild 88 Leistungslose Spannungsmessung mit dem Lichtmarken-Universalelektrometer
*A* Idiostatische Schaltung
*B* Nadelschaltung ($R_1 = R_2$)
*C* Quadrantenschaltung
$U_x$ zu messende Spannung




*A* *B* *C*

Bei der *Quadrantenschaltung* (Bild 88*C*) wird eine Hilfsspannung zwischen die Nadel und ein Quadrantenpaar, die Meßspannung zwischen die beiden Quadrantenpaare gelegt. Auch hier verwendet man die ungeeichte 100-teilige Skale. Der Ausschlag ist nur dann der Meßspannung proportional, wenn bestimmte Hilfsspannungswerte nicht unterschritten werden. Über die Größe der jeweils anzulegenden Hilfsspannung gibt Tafel 54 u.a. Auskunft. Bei Gleichspannungsmessungen arbeitet man mit einer Hilfsgleichspannung, bei Wechselspannungsmessungen mit einer der Meßspannung frequenz- und phasengleichen Hilfswechselspannung.

Die Beruhigungszeit der Lichtmarken-Universalelektrometer beträgt etwa 15s und die Anzeigetoleranz $\pm 1\%$ (sie kann sich bei 20 kHz um $-2\%$, bei 6 MHz um $\pm 1{,}5\%$ verschlechtern).

**Tafel 54** Meßbereichendwerte von Lichtmarken-Universalelektrometern sowie Hilfsspannungen bei Nadel- und Quadrantenschaltungen

| Idiostatische Schaltung | | Nadel- und Quadrantenschaltung | |
|---|---|---|---|
| Meßbereichendwert | Eigenkapazität bei Endausschlag | Hilfsspannung | Meßbereichendwert auf 100teiliger Skale |
| V etwa | pF etwa | V | V |
| 20 | 20 | 60 | 4 bis 6 |
| 60 | 15 | 150 | 12 bis 15 |
| 120 | 15 | 350 | 25 bis 30 |
| 240 | 15 | 450 | 70 bis 80 |

**Kompensatoren.** Bei Kompensationsmessungen wird die zu messende Spannung durch eine gleich große, entgegengesetzt gerichtete Spannung aufgehoben, d.h., sie wird kompensiert: Der vom Kompensationsstrom an unveränderlichen, genau abgeglichenen und bis auf kleinste Dezimalwerte einstellbaren Widerständen hervorgerufene Spannungsabfall wirkt der zu messenden Spannung entgegen. Man wendet also die Nullmethode an, die hinsichtlich der Meßempfindlichkeit höchste Anforderungen erfüllt. Da der Kompensationsstrom entweder unmittelbar einem Normalelement entnommen wird oder einem am Normalelement eingestellten Hilfskompensator, läßt sich bei Kompensationsmessungen eine besonders hohe Meßgenauigkeit erreichen. Da sich ferner Widerstandsmessungen und Strommessungen durch eine einfache Schaltungsanordnung auf Spannungsmessungen zurückführen lassen, können Kompensationsgeräte sowohl zum Prüfen oder amtlichen Eichen von Spannungsmessern als auch von Meßinstrumenten jeder Art (z.B. Strom- und Leistungsmessern) sowie von Widerständen usw. benutzt werden.

Beim *Kleinen Kompensator* zum betriebsmäßigen Messen von Thermospannungen und zum Nachprüfen von Drehspulmeßgeräten werden, wie Bild 89 zeigt, beim Drücken einer der beiden Galvanometertasten (Taste am Schutzwiderstand $R_s$ zum Grobabgleich) die beiden Spannungen unmittelbar gegeneinander geschaltet. Die hochohmige Kaskadenschaltung des Kompensatorkreises und sein hoher Vorwiderstand (insgesamt 100 kΩ) ermöglichen es, daß der Kompensationsstrom direkt dem Normalelement entnommen werden kann, ohne dieses beim kurzzeitigen Abgleichen der Brücke mit Hilfe der vier Drehschalter unzulässig zu belasten. Die höchste zu kompensierende Spannung $U_x$ beträgt 220 mV, Anzeigetoleranz ± 0,1%. Höhere Spannungen können, allerdings nicht leistungslos, über

$U_N$ Spannung des Normalelementes
$U_x$ zu messende Spannung
$R_s$ Schutzwiderstand

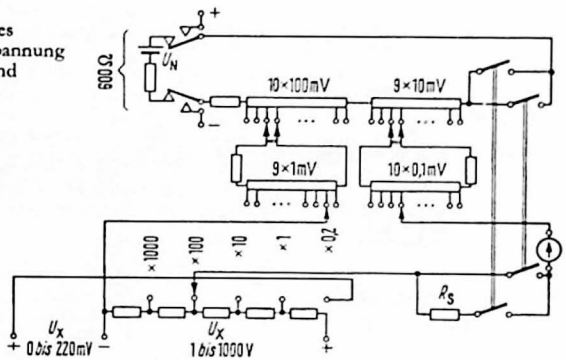


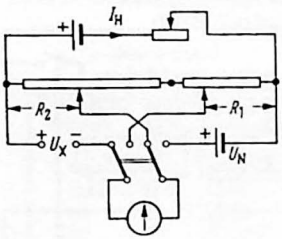

Bild 89 Kleiner Kompensator für betriebsmäßige Messungen

einen eingebauten Spannungsteiler (Stufen 0,2–1—10–100–1000, Anzeigetoleranz $\pm 0{,}2\%$) gemessen werden. — Das Normalelement, ein ungesättigtes, bei dem sich hier ein Temperaturabgleich erübrigt, kann auf Gleitschienen in das Gerät eingeschoben werden. Es läßt sich aber auch ein äußeres Element anschalten.

Bei *Präzisions-Kompensatoren* wird die zu messende Spannung nicht unmittelbar mit der des Normalelementes verglichen, sondern mit dem Spannungsabfall eines Hilfsstromes $I_H$ am Widerstand $R_1$ (Bild 90). Deshalb ist zuvor $R_1$ $I_H$ mit der Spannung $U_N$ des Normalelements zu kompensieren. (Da $I_H$ fein einstellbar ist, könnte $R_1$ konstant sein, doch um die Abhängigkeit des Normalelements von der Temperatur berücksichtigen zu können, ist auch $R_1$ einstellbar.) Bei unverändertem Hilfsstrom bleibt der Hilfskompensator stets in der Abgleichstellung. Zu einer Kontrolle ist nur der Umschalter nach rechts zu legen, ohne daß der Hauptkompensator zurückgestellt werden muß.

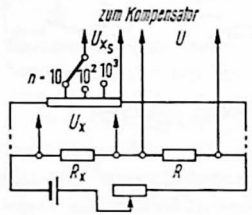
Bei Strommessungen wird der zu messende Strom durch einen außen anzuschließenden Normalwiderstand geschickt und der an diesem hervorgerufene Spannungsabfall gemessen. Es ist $I_x = U_x/R$ ($R$ Widerstand des Normalwiderstandes).

Widerstände werden ermittelt, indem man im äußeren Meßkreis den Prüfling $R_x$ mit einem Normalwiderstand $R$ in Reihe schaltet (Bild 91) und




$I_H$ Hilfsstrom
$U_N$ Spannung des Normalelementes
$R_1$ Widerstand am Hilfskompensator
$U_x$ zu messende Spannung
$R_2$ Widerstand am Hauptkompensator

Bild 90 Präzisions-Kompensator (indirekte Kompensationsmessung), Grundschaltung.



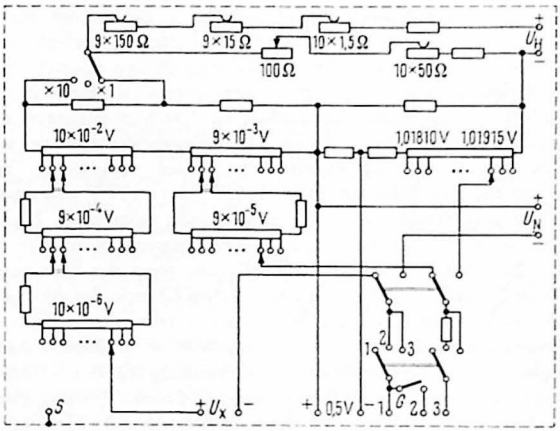

$R_x$ Widerstand des Prüflings
$U_x$ Spannungsabfall am Prüfling
$R$ Normalwiderstand
$U$ Spannungsabfall am Normalwiderstand
$n$ Spannungsteilerverhältnis
$U_{x_s}$ Spannungsabfall $U_x + U$ über Spannungsteiler

Bild 91 Widerstandsmessung mit Präzisions-Kompensator, äußere Grundschaltung.

die von einem Strom an ihnen hervorgerufenen Spannungsabfälle nacheinander mit dem Kompensator mißt. $R_x$ läßt sich dann errechnen zu: $R_x = R\,U_x/U$. — Muß wegen zu großen Spannungsabfalls am Prüfling ($U_x >$ Meßbereich des Kompensators, z.B. bei Spannungsmessern, bei denen die Spannung vorgegeben ist) dieser herabgesetzt werden, so ist ein Spannungsteiler parallel zur Reihenschaltung Prüfling–Normalwiderstand zu legen (in Bild 91 gestrichelt), weil ja durch $R_x$ und $R$ der gleiche Strom fließen soll. Der gesuchte Widerstand ist in diesem Fall

$$R_x = \frac{n\,U_{x_s}}{U}\,R - R.$$

Nach diesem Prinzip ist der *Präzisions-Kaskadenkompensator* (Bilder 92 und 94) mit seinen Zubehörgeräten ausgeführt. Er hat zwei Meßbereiche, und zwar 1,1 V (Größenordnung der EMK des Normalelementes) und 0,11 V. Da einerseits durch den hohen Gesamtwiderstand der Kaskadenschaltung der Einfluß der Übergangswiderstände an den Schaltern vernachlässigbar ist und andererseits der niedrige Kompensationswiderstand von nur etwa 1100 Ω infolge der Gruppenschaltung der fünf Widerstandssätze es erlaubt, ein niederohmiges spannungsempfindliches Galvanometer zu ver-




$U_H$ Hilfsspannung (3,5 bis 5,25 V)
$U_N$ Spannung des Normalelementes
$U_x$ zu messende Spannung

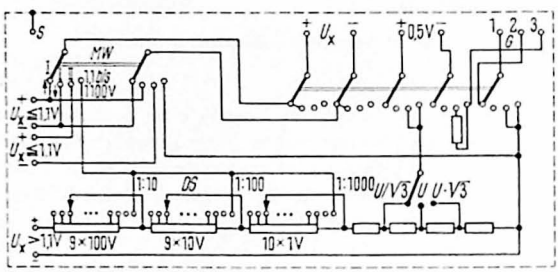
*G* Galvanometer (2—3 überbrücken, wenn *G* keinen eingebauten Vorwiderstand hat)

Bild 92 Präzisions-Kaskadenkompensator

wenden, bietet das Gerät sowohl die Vorteile eines hochohmigen als auch die eines niederohmigen Kompensators. Zum Einstellen des Hilfsstromes sind vier dekadisch unterteilte Stufenwiderstände und ein Feineinsteller eingebaut; zum Kompensieren des vom Hilfsstrom am Widerstand des Hilfskompensators hervorgerufenen Spannungsabfalls durch die Spannung des Normalelementes dient ein Drehschalter mit 22 Stufen für Werte von 1,01810 bis 1,01915 V. Für den Anschluß eines äußeren Spannungsteilers ist eine feste Vergleichsspannung von 0,5 V an gesonderten Klemmen herausgeführt. Das Galvanometer kann mit Hilfe eines doppelpoligen Schalters über einen Schutzwiderstand oder direkt in den Meßkreis gelegt und mit einer Taste zur Dämpfung kurzgeschlossen werden. Ein weiterer Schalter dient zum wahlweisen Schalten auf den Haupt- oder Hilfskompensator. Der Präzisions-Kaskadenkompensator ist hoch isoliert und geschirmt.

Die Schaltung des *Kombinierten Spannungsteilers für den Präzisions-Kaskadenkompensator* zeigt Bild 93. Spannungen innerhalb des Kompensator-Meß-

bereiches 1,1 V werden über die Stellungen I und II des Meßstellenwählers direkt an den Kompensator ($U_x$-Klemmen) gegeben, wobei die beiden Stellungen I zum Wenden des Stromes dienen können. Spannungen $> 1{,}1$ V sind über einen der drei Drehschalterwiderstände bei Stellung „1,1 bis 1100 V" des Meßstellenwählers an den Kompensator zu legen. In der Endstellung je eines dieser Drehschalterwiderstände wird der Meßbereich des Kompensators nämlich in den drei festen Teilungsverhältnissen 10, 100, 1000 auf 11 V, 110 V oder 1100 V erweitert. Über dieselben Schalter lassen sich auch zum Prüfen oder amtl. Eichen von Leistungsmessern alle ganzzahligen Spannungswerte von Volt zu Volt zwischen 1 bis 1000 V vorgeben. Dabei dient dann der Spannungsteiler zum genauen Einstellen und zwischenzeitlichen Überprüfen der Spannung, so daß der zum Abgleichen der Stromspulen verwendete Kompensator für die Spannungsprüfung nicht zurückgestellt zu werden braucht. Der Spannungsteiler wird hierbei an die 0,5 V-Abzweigung des Kompensators gelegt. Mit einem weiteren Schalter lassen sich für die Prüfung von Blindleistungsmessern die $\sqrt{3}$-Werte der Spannungen bis $650 \cdot \sqrt{3}$ oder $1000/\sqrt{3}$ vorgeben.




$U_x$ zu messende Spannung
$MW$ Meßstellenwähler
$DS$ Drehschalterwiderstände
$G$ Galvanometer (2—3 überbrücken, wenn $G$ keinen eingebauten Vorwiderstand hat)

Bild 93 Kombinierter Spannungsteiler zum Kaskadenkompensator

Normalwiderstände für die Strommessung mit dem Präzisions-Kaskadenkompensator werden mit Widerstandswerten von 0,0001 (zul. Belastung etwa 300 A) bis 100 kΩ (10 mA) ausgeführt. Abgeglichen sind sie mit einer Toleranz von ± 0,03%.

Speziell für die amtliche Eichung und Prüfung von Feinmeßinstrumenten wurde der *Präzisions-Stufenkompensator nach Dr. R. Schmidt* entwickelt, an dessen Nennspannungswähler sich nur bestimmte, dem Verwendungszweck des Gerätes entsprechende Spannungswerte einstellen lassen. Zum Kompensieren des Spannungsabfalls am Hilfskompensator sind 16 Stufen für eine EMK des Normalelementes von 1,0177 bis 1,0192 V vorgesehen. Da z. B. beim Eichen von Instrumenten die Anzeige des Prüflings um den Anzeigefehler vom richtigen Wert abweichen kann, wird zur genauen Einstellung eine „Ausschlagskompensation" angewendet. Im weiteren Verlauf werden dann zum Feinabgleich Galvanometerausschläge herangezogen. Das Galvanometer ist hierfür so eingestellt, daß ein Skalenteil einem Meßfehler von 1/10 Skalenteil des Prüflings entspricht.

Mit dem Präzisions-Stufenkompensator kann die Skale eines jeden in der Praxis vorkommenden Prüflings an dekadisch gestuften Meßpunkten amtlich geeicht oder geprüft werden: Mit dem Bereich 100 ist es z. B. möglich, eine 100teilige Skale bei 0–10–20 ..., eine 200teilige Skale bei 0–20–40 ... oder eine 50teilige Skale bei 0–5–10 ... zu eichen.

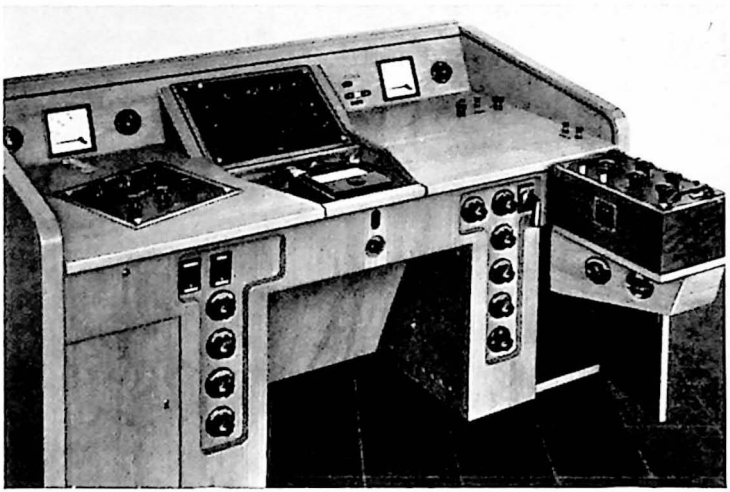
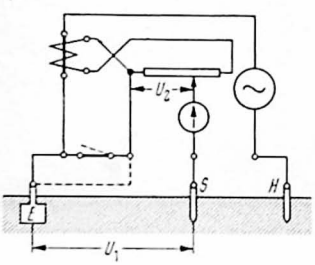


Bild 94 Meßtisch mit Präzisions-Kaskadenkompensator, Kombiniertem Spannungsteiler und Drehschaltermeßbrücke für Widerstandsmessungen

Verbindliche Angaben über die mit Präzisions-Kompensatoren erzielbare Meßgenauigkeit lassen sich nicht machen, da diese sowohl von der Abgleichgenauigkeit der Widerstände ($\pm$ 0,02%) als auch von vielen anderen Bedingungen abhängt, wie z. B. von der Empfindlichkeit des Galvanometers, von der Einstellbarkeit und von Mängeln oder Störeinflüssen in der Außenschaltung (gegenseitige Beeinflussung der Stromkreise, Isolationsfehler, Thermospannungen). Immer gleichbleibende hohe Meßgenauigkeit und Meßempfindlichkeit lassen sich aber mit *Kompensator-Meßtischen* (Bild 94) erreichen, weil bei ihnen die Kompensatoren mit allen Hilfsapparaten und der gesamten äußeren Schaltung unter Berücksichtigung aller äußeren Einflüsse fest eingebaut sind. Infolge der griffgerechten und übersichtlichen Anordnung aller Schaltorgane gestatten sie darüber hinaus ein schnelles Arbeiten.

Auch für die Messung des Erdübergangswiderstandes von Schutz- und Betriebserdungen, Blitzableitern usw. verwendet man heute *einfachere Kompensationsverfahren*. Bild 95 zeigt hierfür die Grundschaltung. Der vom Kurbelinduktor über die Primärwicklung des Stromwandlers, den Erder und den Hilfserder fließende Wechselstrom verursacht zwischen Erder und Sonde einen Spannungsabfall $U_1$. Ihm wird der Spannungsabfall $U_2$ am Abgleichwiderstand (Sekundärkreis des Wandlers) entgegengeschaltet. Bei Spannungsgleichheit stellt sich der Zeiger des Vergleichsinstrumentes, da kein Strom mehr fließt, auf 0 ein; der Erderwiderstand kann jetzt an der Einstellung des Abgleichwiderstandes abgelesen werden. Die Meßgenauigkeit ist praktisch unabhängig von den Widerständen der Sonde und des Hilfserders, die lediglich die Meßempfindlichkeit in geringem Maße beeinträchtigen. — Zum genauen Messen sehr kleiner Erderwiderstände arbeitet man mit getrennten Stromzuführungs- und Potentialleitungen




*E* Erder
*H* Hilfserder
*S* Sonde
$U_1$, $U_2$ Spannungsabfälle

Bild 95
Erdungsmesser, Grundschaltung

zum Erder (in Bild 95 gestrichelt gezeichnet, Klemmenlasche geöffnet), wodurch der reine Erderwiderstand ohne den Widerstand der Zuleitung gemessen wird.

Auch Baugrunduntersuchungen durch Messung des spezifischen Bodenwiderstandes können mit dem Gerät ausgeführt werden (Bild 96). Hierzu sind zwei Elektroden und zwei Spannungssonden in gleichmäßigen Abständen voneinander in den Erdboden zu treiben. Durch gleichmäßiges Vergrößern der Abstände kann man größere Tiefen erfassen und damit die Bodenbeschaffenheit in verschiedenen Tiefenlagen untersuchen (sondieren); durch Messungen an verschiedenen Punkten eines Geländes — immer mit gleichen Sondenabständen — kann man die Höhenlinien einer bestimmten Bodenformation bestimmen (kartieren).

Die *Erdungsmesser* werden in zwei Ausführungen mit je drei an Nebenwiderständen einstellbaren Meßbereichen hergestellt: 0 bis 10; 0 bis 100; 0 bis 1000 Ω und 0 bis 1; 0 bis 10; 0 bis 100 Ω. Mit dem Meßbereichschalter ist ein Empfindlichkeitsschalter gekuppelt. Als Nullinstrument dient ein Drehspulinstrument in Gleichrichteranordnung. Die Anzeigetoleranz beträgt ± 1% des jeweiligen Meßbereichendwertes. Mit dem Gerät für kleinere Widerstände können noch Messungen bei Sonden- und Hilfserderwiderständen vom 5000fachen des Meßbereiches mit einer Anzeigetoleranz von ± 5% ausgeführt werden. Zum Erhöhen der Empfindlichkeit bei Bodenuntersuchungen in großen Tiefen kann man auch ein hochempfindliches Lichtmarken-Instrument anschließen.

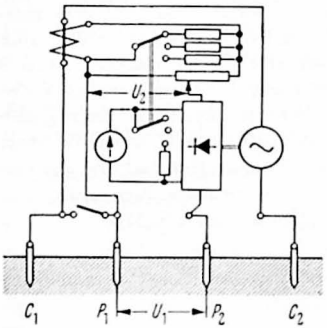
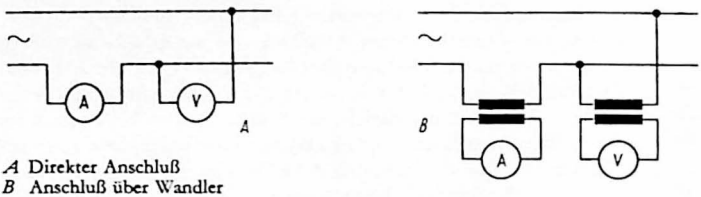



Bild 96 Erdungsmesser, Anschluß bei Bodenuntersuchungen. $C_1$, $C_2$ Elektroden, $P_1$, $P_2$ Spannungssonden, $U_1$, $U_2$ Spannungsabfälle

Bild 97 Erdungsmesser

## Wechselstrom- und Wechselspannungsmessung (Niederfrequenz)

Wechselstrom- und Wechselspannungsmesser für direkten Anschluß (Bild 98*A*) werden je nach der Gehäusegröße nur für begrenzt starke Ströme oder begrenzt hohe Spannungen ausgeführt. Bei stärkeren Strömen wäre die Erwärmung zu groß, der Anschluß zu schwierig sowie die Lage der Zuleitungen auf die Anzeige von Einfluß; bei höheren Spannungen würden unzulässige Kriechströme auftreten. Man verwendet deshalb in diesen Fällen Ausführungen zum Anschluß über Wandler (Bild 98*B*).




*A* Direkter Anschluß
*B* Anschluß über Wandler

Bild 98 Wechselstrom- und Wechselspannungsmesser

**Dreheisen-Strom- und -Spannungsmesser** (s. auch S. 118). Schalttafelinstrumente für direkten Anschluß sind als Strommesser im allgemeinen bis 250 A (bei Großinstrumenten bis 400 A) und als Spannungsmesser bis 600 V erhältlich (vgl. Tafel 31, S. 58). Für den Anschluß über Wandler sind sie entsprechend dessen sekundärem Nennstrom, meist 5 oder 1 A, bzw. entsprechend dessen sekundärer Nennspannung, meist 100 V, ausgelegt. Der Skalenendwert von Strommessern wird dann gleich dem primären Nennstrom gewählt (oder doppelt so groß, wenn die Skale eine außerhalb des Meßbereiches gedrängte Überlastskale ist) und der von Spannungsmessern etwa 20% größer als die primäre Nennspannung. Es gilt die Normenreihe der Meßbereich-Endwerte (s. S. 31).

Tragbare Betriebsinstrumente, Tischinstrumente sowie Feinmeßinstrumente können über die für den direkten Anschluß vorgesehenen Meßbereiche hinaus meist auch noch über Wandler verwendet werden (vgl. Tafel 30, S. 56, und Tafel 31, S. 58). Sie haben dann mindestens einen für den Wandleranschluß geeigneten Meßbereich (5 A oder 6 A bei 20% Wandlerüberlastung; 100 V, ..., 150 V). Das Dreheisen-MULTIZET läßt wegen seines relativ geringen Eigenverbrauches (erhöhte Empfindlichkeit

durch Spannbandlagerung nach Bild 19*B*, S. 47) sogar Wandleranschluß an drei seiner Strom-Meßbereiche (6, 1,5, 0,3 A) zu, denn selbst beim kleinsten wird die Nennbürde des zugehörigen Durchsteck-Kleinwandlers nicht unzulässig überschritten; je nachdem, ob man den Primärleiter ein- oder zweimal durchführt, ergeben sich die erweiterten Bereiche 300, 75, 15 A und 600, 150, 30 A. — Ebenso wie Gleichspannungsmessungen können auch Wechselspannungsmessungen mit Vorwiderstand (bis 3 kV) durchgeführt werden.

Der Vorteil, den das Dreheiseninstrument bietet, mit ihm Effektivwerte unabhängig von der Kurvenform messen zu können, ließ sich bis vor kurzem für Feinmessungen nur in Meßbereichen von 30 mA und 15 V an ausnutzen, und zwar wegen des verhältnismäßig großen Eigenverbrauches der Präzisions-Strom- und -Spannungsmesser. Nunmehr ist dieser bei den Hochempfindlichen Dreheisen-Präzisionsinstrumenten mit Spannbandlagerung und Lichtzeiger (s. S. 61) auf ein 200stel gesenkt worden, so daß Meßbereiche von 1 mA und 1,5 V an möglich sind (vgl. Tafel 33, S. 60). Bei Einbauinstrumenten kommt man auf diese Weise sogar bis zu Meßbereichen von 250 μA und 40 mV (vgl. Fußnoten zu Tafel 31, S. 58).

Die Wirkungsweise der Dreheisenmeßwerke (s. S. 41) bedingt, daß sie an und für sich nicht unabhängig von Fremdfeldern sind. Durch Abschirmungen mit Blechen aus hochpermeablen Legierungen wird der Fremdfeldeinfluß aber auf Werte herabgesetzt, die unter den für die betreffende Klasse zugelassenen bleiben.

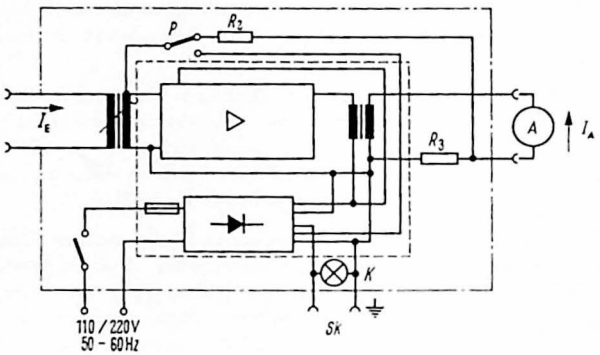
Der übliche Frequenzbereich von Dreheisen-Strom- und -Spannungsmessern ist bei Schalttafelinstrumenten 15 bis 60 Hz. Sonderausführungen, abgeglichen für eine bestimmte Frequenz, gibt es bis zu 1000 Hz. Bei Tischinstrumenten und bei Feinmeßinstrumenten erreicht man mit konstruktiven Mitteln ebenfalls Bereiche von 15 bis 1000 Hz.

**Wechselstrom- und Wechselspannungs-Meßverstärker.** Zur Meßbereicherweiterung der Präzisions-Strom- und -Spannungsmesser bis hinab auf Werte, die bei Feinmessungen nur noch mit den Hochempfindlichen Dreheisen-Präzisionsinstrumenten erfaßt werden können, verwendet man Präzisions-Meßverstärker. Ihr Eigenverbrauch (s. Tafel 55) ist aber noch geringer, und zwar bei den Wechselstrom-Meßverstärkern um eine Größenordnung und bei den Wechselspannungs-Meßverstärkern, die auch als Stromverstärker ausgeführt werden (um den für Spannungsmesser charakteristischen höheren Eigenverbrauch zu umgehen), bis zu zwei Größenordnungen. Präzisions-Meßverstärker ermöglichen

**Tafel 55** Eigenverbrauch von Präzisions-Meßverstärkern

| Meßbereich in mA | 10 | 25 | 50 | 100 | 250 | 500 | 1000 | 0,02 mW/mA |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Eigenverbrauch in mW | 0,2 | 0,5 | 1 | 2 | 5 | 10 | 20 | |
| Meßbereich in V | 1,5 | 3 | 6 | 15 | 30 | 60 | 150 | 300 | 0,1 mW/V |
| Eigenverbrauch in mW | 0,15 | 0,3 | 0,6 | 1,5 | 3 | 6 | 15 | 30 | |

deshalb Feinmessungen in Meßkreisen mit sehr geringer Energie. Der Vorteil des Messens mit diesen Verstärkern erweist sich ganz besonders bei Leistungsmessungen, bei denen nämlich sowohl für den Strom- als auch gleichzeitig für den Spannungspfad nur die geringe Steuerleistung benötigt wird. Darin liegt die Bedeutung der Verstärkermeßplätze für Netzmodellmessungen und für die Bestimmungen von Eisenverlusten.

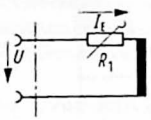



$I_E$ Eingangsstrom
$I_A$ Ausgangsstrom
$P$ Prüftaste
$R_2, R_3$ Präzisionswiderstände
$K$ Kontrollämpchen
$Sk$ Anschluß für Skalenbeleuchtung des Präzisionsinstrumentes

Bild 99 Wechselstrom-Meßverstärker, Grundschaltung

Wechselstrom-Meßverstärker (Bild 99) übersetzen in einer Saugschaltung den zu messenden Strom $I_E$, also den Eingangsstrom, in den Ausgangsstrom $I_A$. Durch starke Gegenkopplung (negative Rückkopplung) wird der Verstärker stabilisiert und der Eingangswiderstand klein gehalten. Die Genauigkeit des Meßergebnisses wird wesentlich von den beiden Präzisionswiderständen $R_2$ und $R_3$ bestimmt und von Schwankungen der Netzspannung nicht beeinflußt. Röhrenalterung und Röhrenwechsel wirken sich nur unbedeutend aus. Die Meßbereichumschaltung erfolgt mit Hilfe eines Schalters an einem primär umschaltbaren Wandler hoher Klassengenauigkeit.

Wechselspannungs-Meßverstärker unterscheiden sich von den Wechselstrom-Meßverstärkern lediglich dadurch, daß die angelegte Meßspannung $U$ erst am Vorwiderstand $R_1$ den zu verstärkenden Strom $I_E$ erzeugen muß (Bild 100) und der Ausgangsstrom $I_A$ den Zeigerausschlag eines Strommessers bewirkt, dessen Skale in Volt geteilt ist. $R_1$ ist entsprechend umschaltbar.

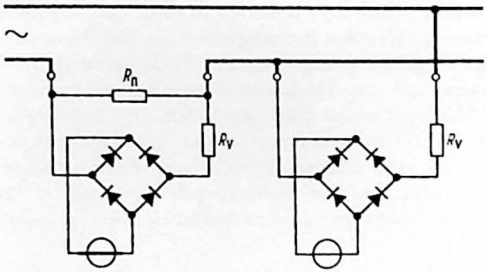



$U$ Meßspannung
$R_1$ Vorwiderstand
$I_E$ Eingangsstrom

Bild 100
Wechselspannungs-Meßverstärker, Grundschaltung des Eingangskreises

**Drehspul-Strom- und -Spannungsmesser.** Um die große Empfindlichkeit der Drehspulmeßwerke auch für Wechselstrom- und Wechselspannungsmessungen ausnutzen und dadurch niedrigere Meßbereiche erfassen zu können als mit Dreheisenmeßwerken, verwendet man sie zusammen mit Gleichrichteranordnungen. Diese sind mit eingebaut (z. B. bei einigen MULTIZET-Instrumenten; Tafel 30, S. 56), denn ihre Kennlinie muß bei der Skalenteilung berücksichtigt werden. Gleichrichterinstrumente sprechen auf den arithmetischen Mittelwert der Meßgröße an. Weil die Skale jedoch bei sinusförmigem Strom- und Spannungsverlauf für Effektivwerte geteilt wird, ist die Anzeige grundsätzlich von Oberschwingungen abhängig. Aus diesem Grunde werden Gleichrichterinstrumente nur als Betriebsinstrumente ausgeführt. (Richtleiter s. S. 151.)

Bild 101 zeigt die Innenschaltungen von Schalttafel-Strom- und -Spannungsmessern mit Drehspulmeßwerk und Meßgleichrichtern. Beim Strommesser ist hier ein Vorwiderstand $R_v$ erforderlich, um den Tempe-




$R_V$ Vorwiderstand
$R_n$ Nebenwiderstand

Bild 101 Schaltungen von Strom- und Spannungsmessern mit Drehspulmeßwerk und Meßgleichrichtern

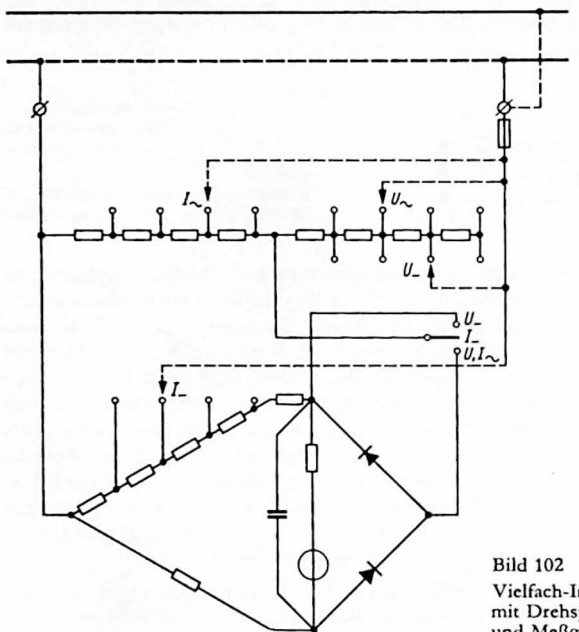



Bild 102
Vielfach-Instrument mit Drehspulmeßwerk und Meßgleichrichtern, Grundschaltung

raturfehler kleinzuhalten und um der Nichtlinearität der Skale entgegenzuwirken, die sich aus der quadratischen Gleichrichterkennlinie ergibt. Beides wird mit einem höheren Spannungsverlust erkauft.

Für direkten Anschluß werden Schalttafelinstrumente mit Meßbereichendwerten von 250 $\mu$A bis 6 A und von 6 V bis 1500 V gebaut. Höhere Ströme und Spannungen mißt man über Wandler (x/5 A, x/1 A; x/100 V.) Auch kann für Spannungen bis 15 kV ein Spannungsteiler nach Bild 75, Seite 117, verwendet werden (vgl. Tafel 31, S. 58). Die Instrumente eignen sich für Messungen bei Frequenzen von 15 bis 10000 Hz, Strommesser mit Meßbereichen $\geqq$250 mA jedoch nur für eine bestimmte Frequenz im Bereich von 40 bis 10000 Hz. Derartige Instrumente sind also bis in das Tonfrequenzgebiet verwendbar und werden deshalb auch zum Anschluß an Tonfrequenzwandler für x/0,01 A und x/0,1 A ausgeführt.

Tischinstrumente mit Drehspulmeßwerk und Meßgleichrichtern sind meistens Vielfach-Instrumente (z. B. das A-V-$\Omega$- und das kHz-MULTIZET; Tafel 30, S. 56). Die Grundschaltung eines solchen Instrumentes zeigt Bild 102. Auch bei dieser Schaltung sind die Strommeßbereiche mit außenliegenden Stromwandlern und die Spannungsmeßbereiche mit außenliegenden Spannungswandlern oder Vorwiderständen erweiterbar. Außerdem ist ein Widerstandsmeßbereich mit Hilfsstromquelle enthalten.

**Elektronische Nullindikatoren.** Diese Nullindikatoren sind hochempfindliche, selektive Meßgeräte zum Abgleich von Wechselstrom-Brückenschaltungen und -Kompensatoren sowie zum Nachweisen kleinster Wechselspannungen. Sie werden in einbahniger Ausführung mit einer Doppelanzeigerröhre für die Anzeige des Betrages der Meßspannung oder in zweibahniger Ausführung mit zwei Doppelanzeigeröhren für die zusätzliche Anzeige der Phase der Meßspannung ausgeführt.

Die Meßspannung (vgl. Bild 103) wird über einen gegengekoppelten, dreistufigen Eingangsverstärker an umschaltbare Bandfilter hoher Selektivität geführt, mit denen drei festbegrenzte Bänder: 50 bis 60 Hz, 120 bis 180 Hz und 280 bis 310 Hz ausgesiebt werden. Mit einem Empfindlichkeitsschalter lassen sich vier verschiedene Verstärkungsgrade wählen; die linear verstärkte Meßspannung kann an gesonderten Ausgangsklemmen z. B. zum Anschluß eines Linienschreibers verwendet werden. Sie bildet auch für Kompensatoren und für Wechselstrommeßbrücken, die mittels Kompensatoren selbsttätig abgeglichen werden, z. B. $C$-tan $\delta$-Meßbrücke (s. S. 223), die erforderliche Regelabweichungsgröße.

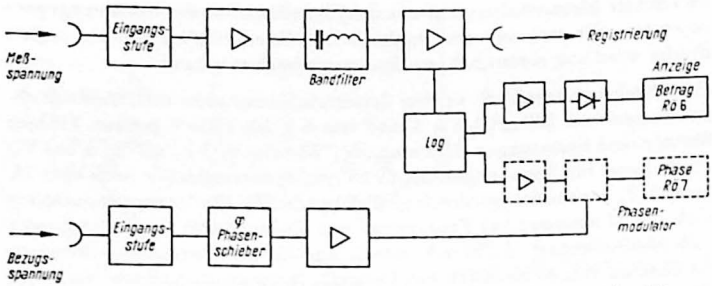
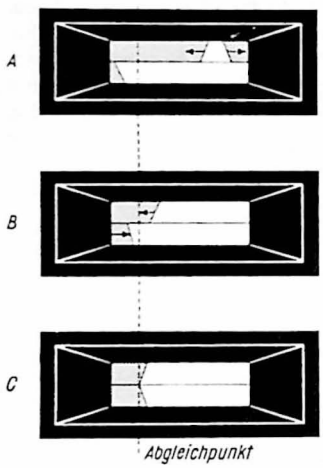



Bild 103 Elektronischer Nullindikator, Blockschaltung der einbahnigen Ausführung (Zusätze für die zweibahnige Ausführung gestrichelt)

Im Eingang der folgenden Verstärkerstufe wird die verstärkte Meßspannung von zwei Dioden logarithmiert, gleichgerichtet und der Anzeigeröhre zugeführt. Die Logarithmierung der Meßspannung ermöglicht zusammen mit der logarithmischen Charakteristik der Anzeigeröhre bei jeder Empfindlichkeitseinstellung eine Anzeige über vier Zehnerpotenzen. Die Lichtzeiger der Doppelanzeigeröhre bewegen sich gegenläufig. Ihre Lichtkanten stehen im abgeglichenen Zustand übereinander und sind auch aus größerer Entfernung deutlich zu erkennen (Bild 104).




*A* stark verstimmt
*B* schwach verstimmt
*C* abgeglichen

Bild 104 Elektronischer Nullindikator, Anzeige des Abgleichzustandes an der Doppelanzeigeröhre

**Tafel 56** Empfindlichkeitsbereiche des Elektronischen Nullindikators

| Schalter-stellung | Linearverstärkung | Spannungsbereich des Anzeigerohres | Eingangs-widerstand des Verstärkers |
|---|---|---|---|
| 1 | Nullpunkt-Einstellung | | 1 kΩ |
| 2 | etwa 40fach | 0,5 bis 2,5 mV | 1 kΩ |
| 3 | etwa 40000fach | 5 bis 25000 µV | 1 kΩ |
| 4 | etwa 40000fach | 0,5 bis 2500 µV | 1 kΩ |
| 5 | etwa 200000fach | 0,1 bis 500 µV | 1 kΩ |

Lichtmarken-Universalelektrometer für praktisch leistungslose Spannungsmessungen bei Gleich- und Wechselstrom s. S. 133.

## Wechselstrom- und Wechselspannungsmessung (Hochfrequenz)

Zur Strom- und Spannungsmessung bei HF muß die Meßgröße in Gleichstrom umgeformt werden, und zwar, je nach den betriebsmäßigen Anforderungen, entweder mit einem Thermoumformer oder mit einem Richtleiter.

Beim *Thermoumformer* fließt ein der Meßgröße proportionaler Strom durch einen Heizdraht und erwärmt direkt oder indirekt (isoliert) ein Thermoelement. Gemessen wird die von der Kurvenform des HF-Stromes unabhängige Thermospannung, so daß die Effektivwerte mit hoher Genauigkeit angezeigt werden können und ein Festlegen der Skale mit Gleichstrom möglich ist (bei direkt geheiztem Thermoumformer ist der Umpolfehler zu berücksichtigen!). Die abgegebene Leistung an das zur Messung verwendete Drehspulinstrument beträgt bei Nennstrom etwa 1 µW. Thermoumformer dürfen nur bis zum doppelten $I_n$ überbelastet werden; infolge thermischer Trägheit haben sie eine relativ große Einstellzeit.

Der *Richtleiter* ist eine Germanium-Diode, deren Kapazität gegenüber anderen Meßgleichrichtern sehr gering (etwa 1 pF) ist, eine Voraussetzung für die Frequenzunabhängigkeit der Messung. Richtleiter arbeiten trägheitslos, sind hoch überbelastbar (kurzzeitig bis $10 \cdot I_n$) und geben bei $I_n$ eine Ausgangsleistung von etwa 500 µW ab. Von Nachteil ist die Oberschwingungsabhängigkeit der Anzeige, denn die Drehspulinstrumente sprechen auf den arithmetischen Mittelwert an, haben aber bei Sinusform in Effektivwerten geteilte Skalen.

**HF-Strommesser.** Damit die zur HF-Strommessung verwendeten Thermoumformer weitgehend frequenzunabhängig sind, müssen sie möglichst dünne Heizdrähte haben; die Kapazität gegen den Element- und Anzeigekreis ist so klein wie möglich zu halten und die Meßstelle auf Erdpotential zu legen. Weil für Nennströme $> 1$ A dickere Heizdrähte notwendig wären, bei denen sich die Stromverdrängung (Skineffekt) auswirkt und dadurch Fehler auftreten, verwendet man in diesen Fällen Stromwandler in Ringkernform und kommt dann wieder mit Thermoumformern kleineren Nennstromes aus.

Der Skalenverlauf von Strommessern mit Thermoumformer ist am Anfang stark gedrängt, da die abgegebene Thermospannung annähernd proportional dem Quadrat des Stromes im Heizdraht ist. Ausführbare Meßbereiche: 5 mA bis 1 A direkt, bis 250 A über HF-Wandler.

HF-Strommesser mit Richtleiter sind stets mit einem Stromwandler kombiniert (Bild 105). Der Sekundärstrom erzeugt an einem ohmschen Bürdenwiderstand eine dem Primärstrom proportionale Spannung (bei $I_n$ etwa 1 bis 2 V), die bei gleichbleibendem Strom und geeigneter Ausführung des Widerstandes weitgehend frequenzunabhängig ist. Die Bürdenspannung wird gleichgerichtet und in einem Drehspulinstrument, dessen Skalenteilung praktisch linear ist, angezeigt. Die ausführbaren Meßbereiche liegen zwischen 150 mA und 250 A. Das Frequenzgebiet reicht bei entsprechender Wandlerausführung vom Tonfrequenzbereich bis max. 100 MHz.

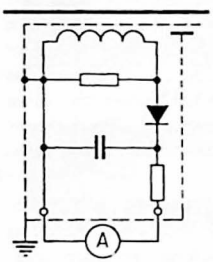



Bild 105
HF-Stromwandler mit Richtleiter, Grundschaltung

**HF-Spannungsmesser** werden meist mit Germanium-Dioden ausgeführt und lassen sich mit großem Eingangswiderstand und kleiner Eingangskapazität (z. B. HF-MULTIZET, Bild 106 und Tafel 30, S. 56) bauen. Die Eingangsschaltung, häufig eine Spannungsverdoppelungsschaltung

(Bild 107), ist im Interesse der Messungen bei höchsten Frequenzen in einem Tastrichter untergebracht, der mit dem Drehspulinstrument über eine geschirmte Leitung verbunden ist. Dadurch werden Fehlmessungen

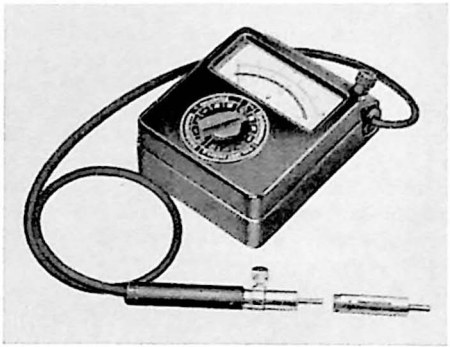


Bild 106
HF-MULTIZET
mit Tastrichter
und aufsetzbarem
Spannungsteiler

durch Zuleitungsinduktivitäten vermieden. Spannungsbereiche zwischen 0,2 V und 20 V können direkt, höhere Meßbereiche bis 1000 V mit Hilfe auf die Tastspitze aufsetzbarer kapazitiver Spannungsteiler ausgeführt werden. Bei geeigneter Dimensionierung der Gleichrichterschaltung (C-Gleichrichtung) kann man innerhalb eines Frequenzgebietes von 50 Hz bis 450 MHz praktisch frequenzunabhängig messen. Zum Messen der Spannung in einer koaxialen Leitung benutzt man Durchgangssteckverbindungen.

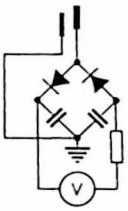
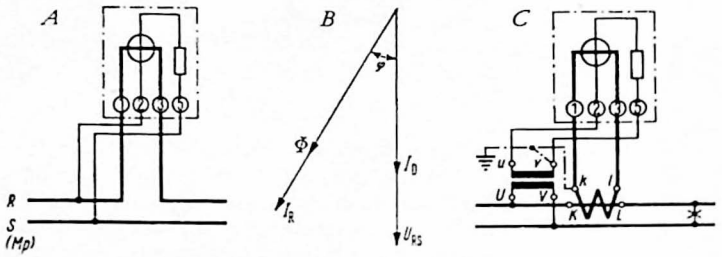



Bild 107
HF-Spannungsmesser mit Richtleiter,
Spannungsverdoppelungsschaltung

# VI. Leistungs- und Leistungsfaktormessung

## Leistungsmessung

**Wirkleistungsmessung.** Die *Leistung eines Gleichstromes* (stets Wirkleistung) kann entsprechend der Gleichung $P = U\,I$ aus einer Spannungs- und einer Strommessung ermittelt werden. Wenn die Meßwerte jedoch stark schwanken oder die Rationalisierung es erfordert, verwendet man auch Leistungsmesser mit elektrodynamischem Meßwerk, die bei Anschluß des Strom- und Spannungspfades ähnlich Bild 108 *A* (Außenleiter P (+) statt R und Mittelpunktleiter Mp geerdet) die Wirkleistung direkt anzeigen. (Bei Leistungsmessungen mit größeren Gleichströmen, etwa $> 20$ A, wird die Feldspule über einen Vorwiderstand an die Spannung gelegt; die Drehspule bildet mit dem Vorwiderstand den Strompfad und ist mit einem Nebenwiderstand verbunden.)




*A* Unmittelbarer Anschluß
*B* Phasenlage von Drehspulstrom und Spannung $U_{RS}$ zum Fluß $\Phi$ in der Feldspule bei Phasenstrom $I_R$ (Bildteil *A*)
*C* Anschluß über Strom- und Spannungswandler

Bild 108 Wirkleistungsmesser für Einphasen-Wechselstrom

Bei *Einphasen-Wechselstrom* gibt ein nach Bild 108 angeschlossener Leistungsmesser oder Leistungsschreiber die Wirkleistung $P = U\,I\cos\varphi$ an. Zu beachten ist, daß nach DIN 43807 die Spannungspfade von Instrumenten für Geräte und Schalttafeln vor den Strompfaden (Leistungsrichtung von links nach rechts) angeschlossen werden und daß bei Anschluß über Wandler die Wandlersekundärseiten stets gemeinsam zu erden sind. Wird die gemeinsame Erdung unterlassen, so können zwischen Strom- und Spannungspfad unzulässig hohe Spannungen auftreten.

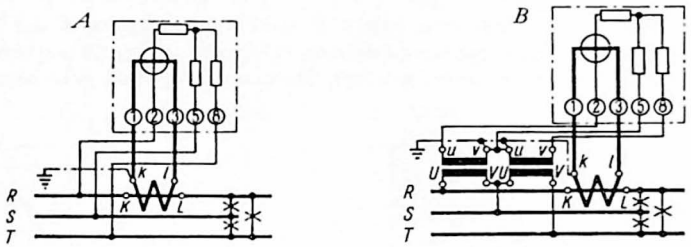
Die *Drehstrom-Wirkleistung* ist die Summe der Leistungen in den drei Hauptleitern ($\curlyvee\ P = 3\,U_{ML}\,I\cos\varphi$, $\triangle\ P = \sqrt{3}\,U_L\,I\cos\varphi$). Am genauesten und in jedem Fall richtig mißt man sie mit je einem Leistungsmeßwerk, deren Anzeigen man addiert, oder mit einem dreisystemigen Meßwerk, bei dem die Drehmomente der einzelnen Systeme mittels gemeinsamer Achse oder Bändchenkupplung zur Anzeige oder Aufzeichnung mechanisch addiert werden. Der Ersparnis wegen und weil in den Gehäusen nicht immer genügend Platz für ein dreisystemiges Meßwerk ist, wählt man aber, wenn die geforderte Genauigkeit es zuläßt, einfachere Lösungen.

Es ergeben sich folgende Möglichkeiten bei:

*Dreileiter-Drehstrom gleicher Belastung*

Einsystemiges Leistungsmeßwerk

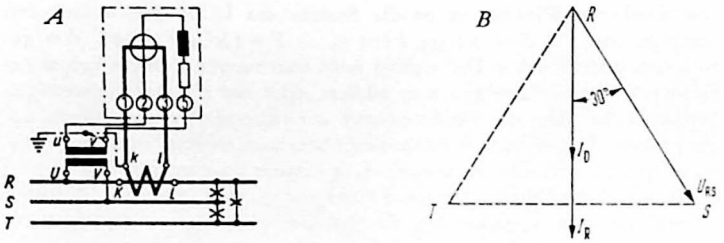
Aus dem Widerstand des Spannungspfades ($R_s + R_v$; s. S. 114) und zwei ebenso großen Widerständen wird ein Nullpunktwiderstand gebildet, so daß der Spannungspfad an Sternspannung liegt (Bild 109 *A*). Verwendet man Spannungswandler, so kommt man mit zwei zweipolig isolierten Wandlern in V-Schaltung aus (Bild 109 *B*).




*A* Anschluß über Stromwandler
*B* Anschluß über Stromwandler und zwei zweipolig isolierte Spannungswandler in V-Schaltung

Bild 109 Wirkleistungsmesser für Dreileiter-Drehstrom gleicher Belastung mit einsystemigem Meßwerk und eingebautem Nullpunktwiderstand

Mit eingebauter Drossel (Kunstschaltung) kann der Spannungspfad an Dreieckspannung gelegt werden (Bild 110). Die Drossel hebt die Phasenverschiebung von 30° gegenüber einer Sternspannung auf.




*A* Anschluß über Strom- und Spannungswandler
*B* Phasenlage des Drehspulstromes $I_D$ (Bildteil *A*)

Bild 110 Wirkleistungsmesser für Dreileiter-Drehstrom gleicher Belastung mit einsystemigem Meßwerk und eingebauter Kunstschaltung

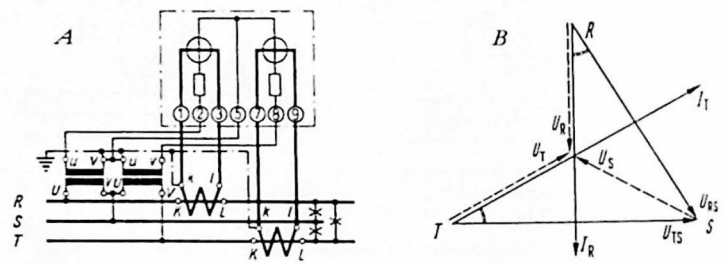
*Drehleiter-Drehstrom beliebiger Belastung*

Zweisystemiges Leistungsmeßwerk

Die Drehstromleistung ist: $P = U_R I_R + U_S I_S + U_T I_T$.
Im Dreileiternetz ist die Summe der Ströme Null: $I_R + I_S + I_T = 0$.
Nach Einsetzen von $I_S = -I_R - I_T$ wird

$$P = U_R I_R - U_S I_R - U_S I_T + U_T I_T = U_{RS} I_R + U_{TS} I_T.$$

Bei der Aron-Schaltung (Bild 111) wird in jedem Meßwerk das Produkt aus einer Spannungsdifferenz (Differenz zweier Sternspannungen) und einem Strom gebildet. Man erreicht mit ihr grundsätzlich




*A* Anschluß über Strom- und Spannungswandler
*B* Zeigerdiagramm der Aron-Schaltung für $\cos\varphi = 1$. Die beiden Meßwerke bilden die Produkte $U_{RS} I_R$ und $U_{TS} I_T$; $I_R$ eilt $U_{RS}$ um 30° nach, $I_T$ eilt $U_{TS}$ um 30° voraus

Bild 111 Wirkleistungsmesser für Dreileiter-Drehstrom beliebiger Belastung mit zweisystemigem Meßwerk in Aron-Schaltung

Unabhängigkeit von Spannungsunsymmetrien und erhält richtige Meßergebnisse, wenn die geometrische Summe der Hauptleiterströme gleich Null ist. Das ist hier (da kein Nulleiter) der Fall, sofern keine Erdschlüsse oder kapazitiven Blindströme gegen Erde eintreten.

„$2^1/_2$-Schaltung" s. Vierleiter-Drehstrom beliebiger Belastung.

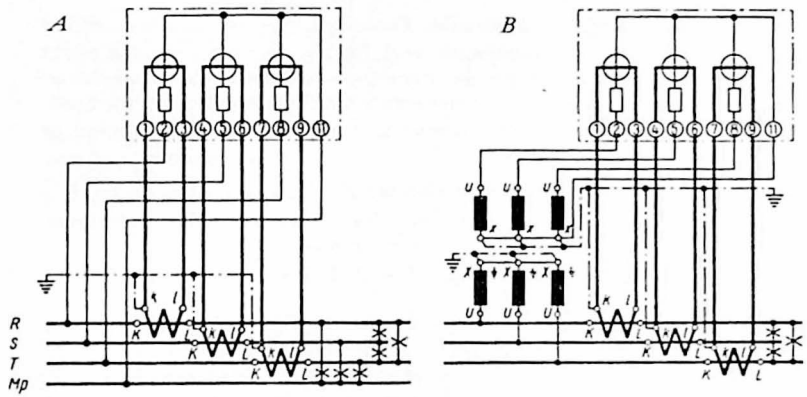
*Vierleiter-Drehstrom beliebiger Belastung*

Dreisystemiges Leistungsmeßwerk

Mit den Schaltungen in Bild 112 *A* und *B* erhält man richtige Meßergebnisse sowohl bei Spannungsunsymmetrien als auch bei Stromunsymmetrien, d.h. wenn auch der Nulleiter Strom führt (Bild 112A).

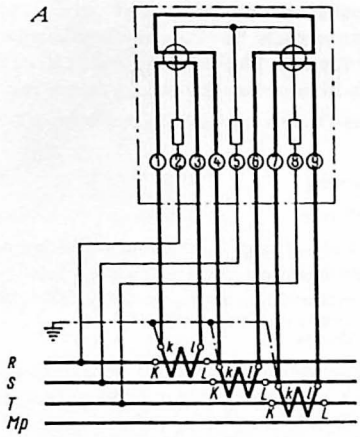
Zweisystemiges Leistungsmeßwerk

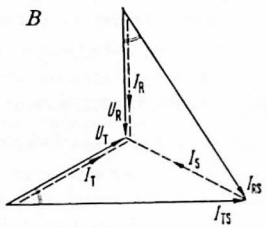
Die $2^1/_2$-Schaltung ist die duale Aron-Schaltung (Bild 113). In jedem Meßwerk wird das Produkt aus einer Stromdifferenz und einer (Stern-) Spannung gebildet. Die Meßwerke haben eine zweite Feldspule, durch die der Strom des dritten Leitungszuges gegensinnig über beide Meßwerke geführt wird. Der Nullpunkt im Spannungs-




*A* Anschluß über Stromwandler,
*B* Anschluß über Stromwandler und drei einpolig isolierte Spannungswandler in Hochspannungs-Dreileiternetzen

Bild 112 Wirkleistungsmesser für Vierleiter-Drehstrom beliebiger Belastung mit dreisystemigem Meßwerk




*A* Anschluß über Stromwandler
*B* Zeigerdiagramm der $2^1/_2$-Schaltung bei $\cos\varphi = 1$. Die beiden Meßwerke bilden die Produkte $U_R\, I_{RS}$ und $U_T\, I_{TS}$; $I_{RS}$ eilt $U_R$ um 30° voraus, $I_{TS}$ eilt $U_T$ um 30° nach

Bild 113 Wirkleistungsmesser für Vierleiter-Drehstrom beliebiger Belastung mit zweisystemigem Meßwerk in „$2^1/_2$-Schaltung"

pfad wird künstlich geschaffen. Diese Schaltung ist im Gegensatz zur Aron-Schaltung unabhängig von Stromunsymmetrien und ergibt keine Meßfehler, wenn die geometrische Summe der Hauptleiterspannungen Null ist. Man nutzt also die Tatsache aus, daß die Spannungssymmetrie in Vierleiternetzen zumeist besser gewährleistet ist als die Stromsymmetrie.

Die Drehstromleistung ist auch hier: $P = U_R\, I_R + U_S\, I_S + U_T\, I_T$.
Bei Spannungssymmetrie ist $U_R + U_S + U_T = 0$.
Nach Einsetzen von $U_S = -U_R - U_T$ wird

$$P = U_R\, I_R - U_R\, I_S - U_T\, I_S + U_T\, I_T = U_R\, I_{RS} + U_T\, I_{TS}.$$

**Blindleistungsmessung.** Die Blindleistung $P_q$ wird, ausgehend von der Wirkleistungsmessung, durch Verschieben der Spannung um 90° gemessen. Bei Einphasen-Wechselstrom ($P_q = U\, I \sin\varphi$) bewirkt man die Verschiebung mit einer 90°-Schaltung nach Bild 114, bei Drehstrom ($\curlyvee\ P_q = 3\, U_{ML}\, I \sin\varphi$, $\triangle\ P_q = \sqrt{3}\, U_L\, I \sin\varphi$) dagegen dadurch, daß man den Meßwerken eine solche Spannung zuführt, die gegenüber der zur Wirkleistungsmessung verwendeten Spannung um 90° gedreht ist (vgl. Bild 109A mit Bild 115; s. auch Bilder 116 und 117). Das bietet gegen-

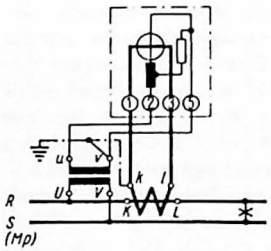



Bild 114
Blindleistungsmesser für Einphasen-Wechselstrom in 90°-Schaltung

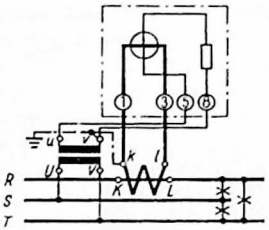



Bild 115
Blindleistungsmesser für Dreileiter-Drehstrom gleicher Belastung mit einsystemigem Meßwerk

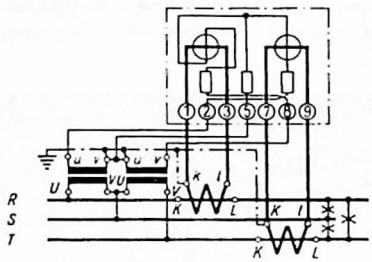
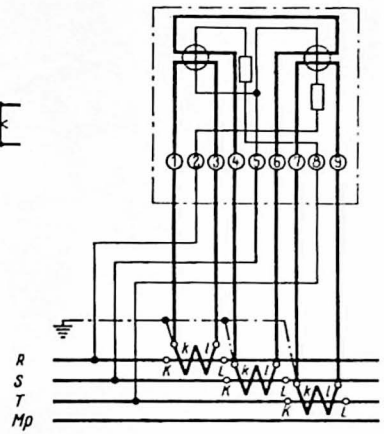



Bild 116
Blindleistungsmesser für Dreileiter-Drehstrom beliebiger Belastung mit zweisystemigem Meßwerk

Bild 117
Blindleistungsmesser für Vierleiter-Drehstrom beliebiger Belastung mit zweisystemigem Meßwerk in „$2^1/_2$-Schaltung"




über der 90°-Schaltung den Vorteil der Frequenzunabhängigkeit. Die Blindleistung wird in BW (Blindwatt, in Deutschland üblich) oder Var (Volt-Ampere reaktiv) gemessen (1 BW = 1 Var).

**Wirk- und Blindleistungsmesser** haben als *Betriebsinstrumente* ein-, zwei- (s. Bild 9, S. 39) oder dreisystemige eisengeschlossene elektrodynamische Meßwerke. Insbesondere für Schalttafelinstrumente und Schreiber gelten die in den Bildern 108 bis 117 wiedergegebenen Schaltungen. Leistungsmesser in der Ausführung der tragbaren Betriebsinstrumente (s. S. 51) sind ähnlich geschaltet, jedoch auf verschiedene Spannungen und z. T. auch zwischen Wirk- und Blindleistung umschaltbar. Als Tischinstrument steht der (Wirk-) *Leistungsmesser Form Z* (Bild 118) mit einem einsystemigen Meßwerk zur Verfügung, der über seine Nennspannung hinaus bei Einphasen-Wechselstrom durch ansteckbare Vorwiderstände und bei Dreileiter-Drehstrom gleicher Belastung mit außen anschließbarem Nullpunktwiderstand verwendet werden kann. Aus zwei

Bild 118
Leistungsmesser
Form Z

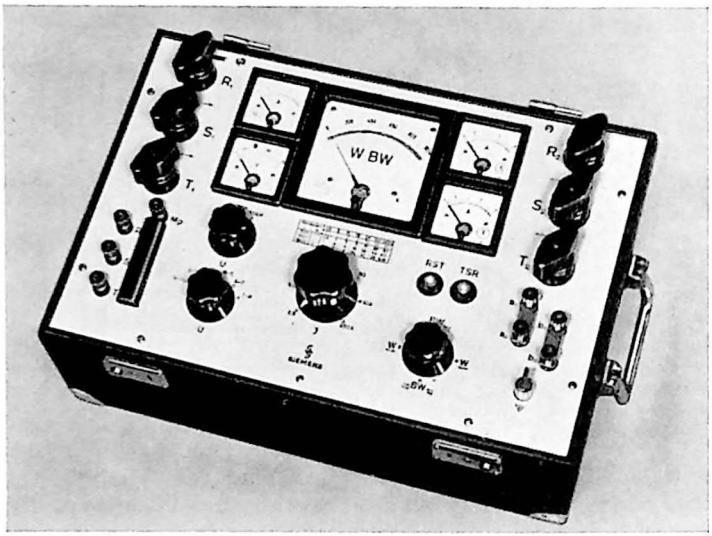



Bild 119 Leistungs-Meßkoffer, Frontplatte

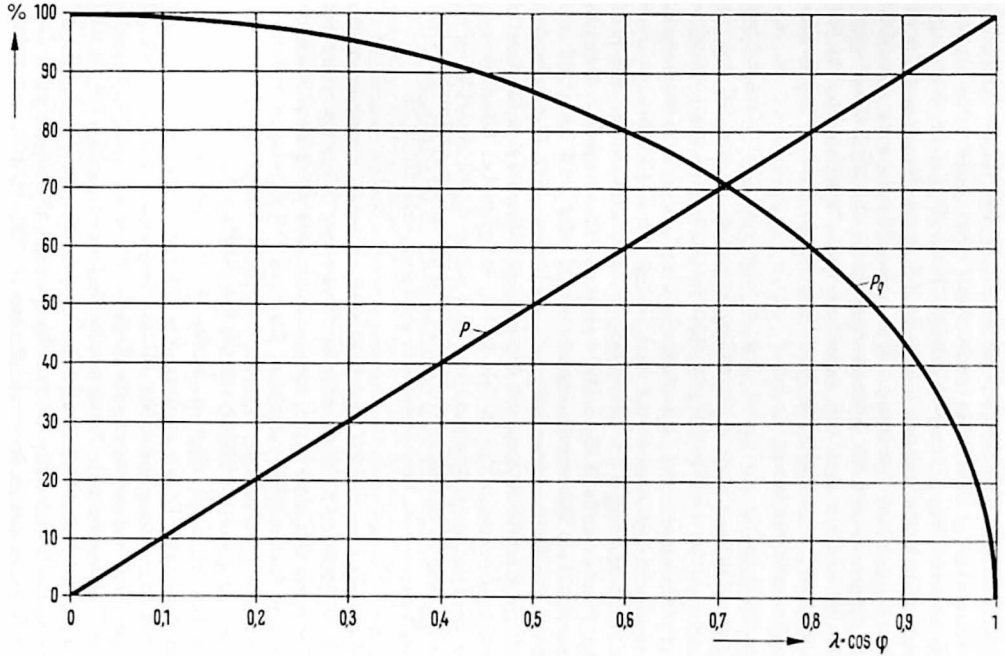



Bild 120 Abhängigkeit der Wirkleistung $P$ und der Blindleistung $P_q$ vom Leistungsfaktor $\lambda = \cos\varphi$. Der Ordinatenwert 100% ist gleich der Scheinleistung $P_s$

Leistungsmessern Form Z und Vorwiderständen sowie Wandlern lassen sich Meßschaltungen aufbauen, wie sie Bild 123, S. 164, als ein Beispiel für Feinmessungen zeigt. Einfacher und sicherer gegen Schaltfehler ist aber das Arbeiten mit dem *Leistungs-Meßkoffer* (Bild 119), der für Messungen in Dreileiter-Drehstromanlagen beliebiger Belastung (Strombelastung der einzelnen Hauptleiter, Spannung, Wirk- und Blindleistung, Drehfeldrichtung, Unsymmetrie im Spannnungsdreieck und Erdschluß) fertig geschaltet ist und mit dem sich außerdem ohne Umrechnungen in Einphasen-Wechselstromanlagen Strom-, Spannungs- und Wirkleistungsmessungen ausführen lassen.

Über die Anschlußwerte der Betriebs-Leistungsmesser und -schreiber s. Tafel 31, S. 58, und Tafel 36, S. 72, über den Eigenverbrauch Tafel 32, S. 59, und Tafel 36, S. 72. Die Skalenendwerte von Schalttafelinstrumenten werden für Nennstrom und Nennspannung jeweils unter Berücksichtigung des Leistungsfaktors $\lambda = \cos\varphi$ (je nach Anlage zwischen 0,5 u. 1) sowie eines Überlastzuschlages in Anlehnung an die Normenreihe der Meßbereichendwerte (s. Tafel 25, S. 31) bestimmt. Die tragbaren Betriebsinstrumente haben Skalenendwerte von 1, 1,2 oder 2 kW bzw. 1,2 oder 2 kW/BkW für Endausschlag bei $I_n$, $U_n$ und $\cos\varphi \approx 0{,}9$. Der Leistungsmesser Form Z ist für 100 und 500 W ausgelegt. Üblicher Frequenzbereich der Betriebsinstrumente ist 40 bis 60 Hz, lediglich bei Blindleistungsmessern für Einphasen-Wechselstrom und bei Wirkleistungsmessern für Drehstrom gleicher Belastung mit Drossel ist er 49 bis 51 Hz. Wie Wirk- und Blindleistung vom Leistungsfaktor abhängen, zeigt Bild 120.

*Feinmeßinstrumente* für Wirk- und Blindleistung haben eisenlose elektrodynamische Meßwerke. Die astatischen Präzisions-Leistungsmesser sind aber nicht nur völlig ohne Eisen, sondern überhaupt weitgehend aus nichtmetallischen Werkstoffen aufgebaut. Da ferner die geringen Induktivitäten der beiden Drehspulen kapazitiv kompensiert sind, ist in Kl 0,2 ein Nennfrequenzbereich 15 bis 50 bis 500 Hz möglich, in Kl 0,5 sogar bis 1500 Hz. Bild 10, S. 40, zeigt das Meßwerk. Die Drehspulen bleiben bei Lichtmarkenanzeige immer annähernd in demselben Feldbereich (s. S. 61 bis 62); Vollausschlag wird bei einem Drehwinkel von 15° erreicht. Außer der Standardausführung für direkten Anschluß und für Wandleranschluß (Strompfad über Präzisions-Stöpsel-Stromwandler für 10 Meßbereiche von 0,1/5 bis 100/5 A) gibt es auch Ausführungen, die im Bereich von 25 mA bis 10 A jeweils auf zwei Nennströme (Stromspulen in Reihe oder parallel) und auf die Nennspannungen 90 (100, 110) und 180 (220) V

umschaltbar sind. Mit diesen können Messungen vorgenommen werden, bei denen Wandler wegen der mit zu erfassenden Gleichstromkomponenten nicht verwendbar sind. Zusatzgeräte von Präzisionsleistungsmessern sind zwei Vorwiderstände für Einphasen-Wechselstrom ($U_n$ = 120, 240, 420 und 600 V bzw. 150, 300, 450 und 600 V), ein Nullpunktwiderstand für Dreileiter-Drehstrom gleicher Belastung ($U_n$ = 90 V) (Schaltungsbeispiel Bild 121) und ein Wirk-Blindlast-Vorwiderstand für Dreileiter-Drehstrom beliebiger Belastung ($U_n$ = 120 V). Bei Feinmeßschaltungen mit zwei Leistungsmessern (Bilder 122 und 123) kann es nötig sein, die Stromrichtung in einer Drehspule zu ändern, damit bei beiden Instrumenten die Zeiger ausschlagen. Dazu dient je Instrument ein Polwender. Bei genauen Messungen sollen die linken Spannungs- und Stromklemmen jedes Leistungsmessers gleiches Potential haben.

Die Anschlußwerte von astatischen Präzisions-Leistungsmessern betreffend, vgl. Tafel 31, S. 58, den Eigenverbrauch gibt die Tafel 33, S. 61, an. Die Instrumente haben eine 150teilige Skale und sind für $\cos\varphi = 1$ oder 0,1 ausgelegt. Infolge der hohen Überbelastbarkeit des Strompfades wird auch bei $\cos\varphi = 0{,}5$ bzw. 0,05 Endausschlag erreicht. Die Meßergebnisse sind nicht direkt ablesbar, sondern müssen nach den in den Bildunterschriften 121 bis 123 angegebenen Gleichungen ermittelt werden. Es bedeuten:

$P$ gemessene Leistung in W
$I_{1n}/I_{2n}$ Stromwandler-Übersetzungsverhältnis. $I_{2n}$ muß 5 A sein
$U_{1n}/U_{2n}$ Spannungswandler-Übersetzungsverhältnis. $U_{2n}$ muß 100 V sein

| $c$ Instrumentkonstante der Leistungsmesser bei $\cos\varphi = 1$ in W/Sktl. bzw. BW/Sktl. | Umschaltbares Instrument | Standard-Instrument |
|---|---|---|
| 1000-Ω-(30-V-)Klemme | $0{,}2 \cdot I_n$ | 1 |
| 90-V-Klemme | $0{,}6 \cdot I_n$ | 3 |
| 180-V-Klemme | $1{,}2 \cdot I_n$ | — |

$C$ Widerstandskonstante (Meßbereicherweiterungsfaktor)
$\alpha$ Anzeige in Skalenteilen

Zur Leistungsmessung bei Wechsel- und Gleichstrom mit minimalem Eigenverbrauch wird das *Präzisions-Milliwattmeter* verwendet, dessen eisenloses elektrodynamisches Meßwerk dem des hochempfindlichen Dreheiseninstrumentes nachgebaut ist. An die Stelle des beweglichen Eisens ist bei ihm die Spannungsspule getreten (s. Bild 11, S. 40). Wegen der doppelten Abschirmung hat das Milliwattmeter auch guten Fremdfeld-

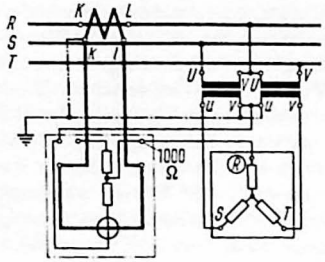



Bild 121 Feinmeßschaltung zur Wirkleistungsmessung an Dreileiter-Drehstrom gleicher Belastung mit einem astatischen Präzisionsinstrument in Standardausführung und einem Nullpunktwiderstand.

$$P = \frac{I_{1n}}{I_{2n}} \cdot \frac{U_{1n}}{U_{2n}} c C \alpha$$

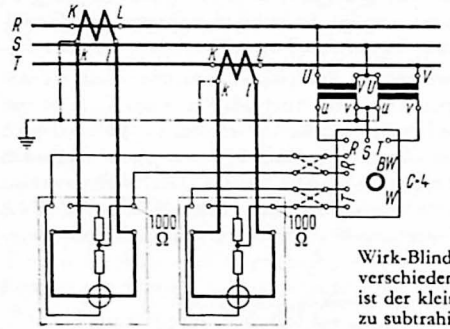



Bild 122 Feinmeßschaltung zur Wirk-Blindlast-Messung an Dreileiter-Drehstrom beliebiger Belastung mit zwei astatischen Präzisionsinstrumenten in Standardausführung und einem Wirk-Blindlast-Vorwiderstand. Bei verschiedener Stellung der Polwender ist der kleinere Ausschlag vom größeren zu subtrahieren.

$$P = \frac{I_{1n}}{I_{2n}} \cdot \frac{U_{1n}}{U_{2n}} c C(\alpha_1 \pm \alpha_2), \quad P_q = \frac{I_{1n}}{I_{2n}} \cdot \frac{U_{1n}}{U_{2n}} c C(\alpha_1 \pm \alpha_2)$$

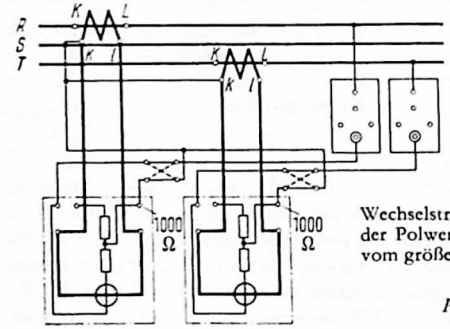



Bild 123 Feinmeßschaltung zur Wirkleistungsmessung an Dreileiter-Drehstrom beliebiger Belastung mit zwei astatischen Präzisionsinstrumenten in Standardausführung und zwei Vorwiderständen für Einphasen-Wechselstrom. Bei verschiedener Stellung der Polwender ist der kleinere Ausschlag vom größeren zu subtrahieren.

$$P = \frac{I_{1n}}{I_{2n}} c C(\alpha_1 \pm \alpha_2)$$

schutz. Seine Werte für den Eigenverbrauch sind in Tafel 33, S 61, angegeben. Es werden die Bereiche des Spannungspfades an vier Klemmen, die des Strompfades mit zwei Stöpseln umgeschaltet, so daß im ganzen 12 Kombinationen von Nennströmen und -spannungen je Typ einstellbar sind. Je nach Meßaufgabe lassen sich die Bereiche so wählen, daß entweder der Verbrauch im Strompfad oder der im Spannungspfad extrem kleingehalten wird.

**Tafel 57** Induktivität und Wirkwiderstand im Strompfad des Präzisions-Milliwattmeters

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Nennstrom (mA) | 2,5; 25 | 5; 50 | 10; 100 | 20; 200 |
| Induktivität (mH) | 46 | 11,5 | 3,04 | 0,76 |
| Widerstand (Ω) | 118 | 9,5 | 6,8 | 1,7 |

Mit dem Instrument kann im ganzen Niederfrequenzgebiet gearbeitet werden, da es seine Klasse für jeden $\cos\varphi$ von 15 bis 50 bis 1000 Hz (bei $\cos\varphi = 1$ sogar bis 1500 Hz) einhält. So lassen sich z.B. Leistungen von Kleinstmotoren, Lichtquellen oder von Zähler- und Relaisspulen ohne weitere Hilfsmittel direkt und bei günstiger Einstellzeit des Instrumentes ($< 2$s) auch rasch messen.

## Leistungsfaktormessung

Induktive und kapazitive Widerstände bewirken in einem Wechselstromkreis, daß sich der Strom nicht gleichzeitig mit der Spannung ändert, sondern daß er ihr gegenüber nach- oder voreilt. Die Widerstände verursachen also eine zeitliche Verschiebung zwischen Strom und Spannung, eine „Phasenverschiebung", die, der vektoriellen Darstellung folgend, in Winkelgraden als Phasenverschiebungswinkel $\varphi$ angegeben wird. $\varphi$ liegt zwischen 0 und 90°. Weil der Kosinus des Phasenverschiebungswinkels in die Wirkleistung eingeht, nennt man $\cos\varphi$ den Wirk- oder Leistungsfaktor $\lambda$.

Eine *gelegentliche Nachprüfung* des Leistungsfaktors einer Anlage kann man mit einem Strom-, einem Spannungs- und einem Wirkleistungsmesser durchführen, indem man $\cos\varphi$ folgendermaßen ermittelt:

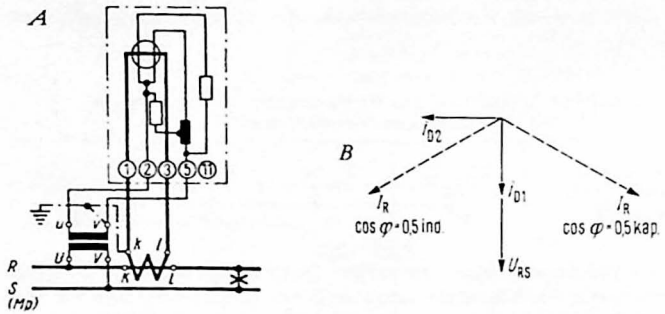
Einphasen-Wechselstrom

$$\cos\varphi = \frac{P}{U\,I}$$

Dreileiter-Drehstrom gleicher Belastung

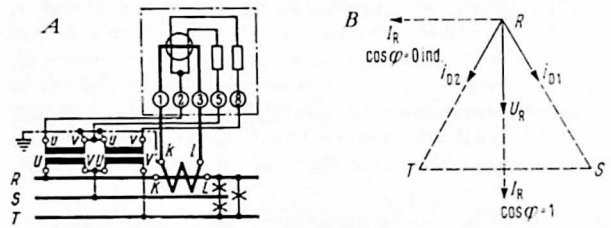
$$\curlyvee\ \cos\varphi = \frac{P}{3\,U_{ML}\,I}, \qquad \triangle\ \cos\varphi = \frac{P}{\sqrt{3}\,U_L\,I}$$

Zur *ständigen Überwachung* der Phasenverschiebung (z. B. in Kraftwerken und bei Großverbrauchern) verwendet man *Leistungsfaktormesser und Leistungsfaktorschreiber*. Diese haben eisengeschlossene elektrodynamische Quotientenmeßwerke, deren Polschuhe so geformt sind, daß der zwischen




*A* Anschluß über Strom- und Spannungswandler
*B* Zeigerdiagramm zur Leistungsfaktormessung bei Einphasen-Wechselstrom. Drehspulstrom $i_{D1}$ in Phase mit $U_{RS}$, Windungsfläche der Drehspule 1 parallel zum Zeiger; Drehspulstrom $i_{D2}$ eilt $U_{RS}$ um 90° nach, Windungsfläche der Drehspule 2 senkrecht zum Zeiger

Bild 124 Leistungsfaktormesser für Einphasen-Wechselstrom in Kunstschaltung mit dem Meßbereich 0,5 kap.-1-0,5 ind.




*A* Anschluß über Strom- und Spannungswandler
*B* Zeigerdiagramm zur Leistungsfaktormessung bei Dreileiter-Drehstrom. Drehspulströme $i_{D1}$ und $i_{D2}$ gegenüber $U_R$ um 30° verschoben, d. h. in Phase mit $U_{RS}$ und $U_{TR}$

Bild 125 Leistungsfaktormesser für Dreileiter-Drehstrom gleicher Belastung mit dem Meßbereich 0-1

jedem Polschuh und dem Kern befindliche Luftspalt in der Mitte am engsten und an den Enden am weitesten ist. Dadurch wird der Verlauf des vom Strompfad hervorgerufenen Feldes annähernd sinusförmig. Die beiden Drehspulen sind gekreuzt und liegen in Quotientenschaltung an gegeneinander phasenverschobenen Spannungen. Während bei Einphasen-Wechselstrom erst durch eine Kunstschaltung eine gegenüber der Netzspannung verschobene Spannung erzeugt werden muß, wird bei Drehstrom die phasenverschobene Spannung unmittelbar dem Netz entnommen (s. Bild 124 und 125). Die Drehspulströme erzeugen in dem inhomogenen Magnetfeld stellungsabhängige, gegeneinander gerichtete Drehmomente. Das bewegliche Organ nimmt daher als Gleichgewichtslage die Stellung ein, in der beide Drehmomente gleich groß sind. Die Einstellung ist eine direkte Funktion des Phasenverschiebungswinkels $\varphi$, so daß die Skale in $\cos\varphi$-Werten geteilt werden kann (0,5 kap.-1-0,5 ind.; 0,8 kap.-1-0,2 ind.; 0-1, induktive Belastung angenommen). Das Einstellmoment ist von der Stromstärke im Strompfad abhängig und so groß, daß bei Nennspannung schon 20% des Nennstromes für eine sichere Zeigereinstellung ausreichen. Da Leistungsfaktormesser keine Richtkraftfedern haben, hat der Zeiger im stromlosen Zustand des Instrumentes auch keine bestimmte Ruhelage. Gegen Störungen durch magnetische Streufelder sind die Meßwerke nahezu unempfindlich. Zu beachten ist, daß Leistungsfaktormesser u. Leistungsfaktorschreiber den Leistungsfaktor des Leitungszuges angeben, in dem die Stromspule liegt, daß also für Drehstrom gleiche Belastung vorauszusetzen ist.

Daten von Leistungsfaktormessern und Leistungsfaktorschreibern s. Tafel 31, S. 58, Tafel 32, S. 59, und Tafel 36, S. 73.

# VII. Synchronisiereinrichtungen

Drehstromgeneratoren dürfen nur dann parallelgeschaltet werden, wenn sie synchron laufen, d.h. bei Spannungs-, Frequenz- und Phasengleichheit. Um diese Bedingungen durch Verstellen der Drehzahl der Antriebsmaschine und durch Verändern des Erregerstromes erfüllen zu können, verwendet man Doppelspannungs- und Doppelfrequenzmesser sowie Nullspannungsmesser (bei kleineren Anlagen) oder Synchronoskope (bei größeren Anlagen). Meist werden die erforderlichen Schalttafelinstrumente zu Meßsätzen zusammengefaßt und entweder auf einem Wandarm (Bild 126) oder an einem Scherenarm zum Einbau in Schalttafeln drehbar montiert. Die Meßsätze können dann in die jeweils für das Ablesen günstigste Richtung eingestellt werden.

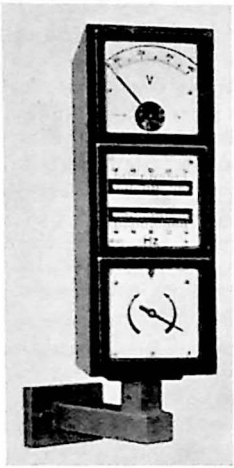


Bild 126
Meßsatz zum Paralellschalten von Drehstromgeneratoren: Doppelspannungsmesser, Doppelfrequenzmesser und Synchronoskop

**Doppelspannungsmesser.** In einem Gehäuse sind zwei voneinander unabhängige Dreheisenmeßwerke (s. S. 41) untergebracht, die gegebenenfalls über Wandler an die zu vergleichenden Spannungen gelegt werden. Während bei den bisher üblichen Instrumenten der eine Zeiger in gewohnter Weise vor der Skale spielt und der andere mit seiner als Kennmarke ausgebildeten Spitze von hinten durch einen oberhalb der Skalenbeschriftung befindlichen Schlitz ragt, hat bei neueren Instrumenten jeder Zeiger seine eigene Skale („Doppel-Flachprofilinstrumente" in Querformat; vgl. Bild 20, S. 49). Doppelspannungsmesser werden für $2 \times 100$ bis $2 \times 600$ V ausgeführt.

**Doppelfrequenzmesser.** Zwei voneinander unabhängige Vibrationsmeßwerke (s. S. 45) sind in einem Gehäuse so vereinigt, daß die Frequenzen beider Netze bequem verglichen werden können. Doppel-

frequenzmesser mit dem Bereich 2×46 bis 54 Hz gibt es für Nennspannungen zwischen 100 und 500 V. Zum Anschluß an höhere Spannungen stehen außenliegende Vorwiderstände zur Verfügung. Die Nennspannung soll allgemein nicht mehr als um 15% unterschritten werden. Sie hat zwar keinen Einfluß auf die Anzeigegenauigkeit, doch bestimmt sie die Amplitude der Zungenausschläge.

**Nullspannungsmesser.** Nachdem der parallelzuschaltende Generator auf die richtige Frequenz und Spannung gebracht wurde, ist die Phasengleichheit herzustellen. Der dazu in „Dunkelschaltung" verwendete Nullspannungsmesser hat ein Dreheisenmeßwerk und zeigt die geometrische Differenz der zu vergleichenden Spannungen an. Sein Zeiger schwankt entsprechend der Schwebungskurve der resultierenden Spannung hin und her und geht bei Phasengleichheit auf die besonders gekennzeichnete Nullmarke zurück. Damit kleine Abweichungen gut erkennbar sind, ist die Skale des Instrumentes durch Vorschalten von Kaltleitern (Glühlampen 60 W, 220 V; eine bei $U_n = 110$ V, zwei bei $U_n = 220$ V und vier bei $U_n = 380$ V) am Anfang weit auseinandergezogen. — Endausschlag ergibt das Instrument bei doppelter Nennspannung.

**Synchronoskop.** Das Meßwerk ist ein kleiner Motor, dessen Stator von dem zu synchronisierenden Generator gespeist wird und dessen Rotor am Netz liegt. Sind die Frequenzen verschieden, so dreht sich der Rotor und damit der auf seiner Achse befestigte Zeiger proportional der Frequenzdifferenz rechts oder links herum, je nachdem, ob die Frequenz der zu synchronisierenden Maschine zu groß oder zu klein ist. Sind beide Frequenzen und Spannungen gleich, die Spannungen jedoch nicht in Phase, so bleibt der Zeiger in einer Stellung stehen, die um den Phasenwinkel zwischen den beiden Spannungen von der Nullmarke abweicht; bei Synchronismus steht der Zeiger auf der Nullmarke (es genügt für das Parallelschalten, wenn er langsam durch diese Stellung geht). Gegenüber einem Nullspannungsmesser bietet also ein Synchronoskop den Vorteil, daß es nicht nur Phasengleichheit anzeigt, sondern auch angibt, in welchem Sinne der zuzuschaltende Generator zu steuern ist.

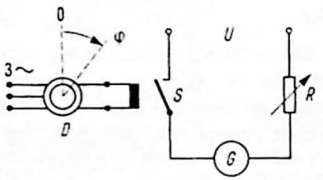
Synchronoskope werden für dreiphasigen und einphasigen Anschluß ausgeführt (Eigenverbrauch bei den verschiedenen Anschlußwerten s. Tafel 32, S. 59). Das Einphasen-Synchronoskop muß sowohl bei Einphasen-Wechselstrom als auch bei Dreileiter-Drehstrom über ein Zusatzgerät mit eingebauter Kunstschaltung zum Erzeugen der erforderlichen phasenverschobenen Ströme angeschlossen werden.

# VIII. Zeiger-Messungen

## Zeiger-Meßanordnung mit Synchronschalter und Drehspulinstrument

Messungen von linearen Mittelwerten und von Augenblickswerten (insbesondere von Maximalwerten) periodisch veränderlicher Spannungen oder Ströme werden mit der Zeiger-Meßanordnung nach Bild 127 vorgenommen. Unter der Bezeichnung „lineare Mittelwerte" sollen hier Werte verstanden werden, die über eine halbe (!) Periode gebildet worden sind und nicht, wie es sonst üblich ist, über eine ganze (vgl. Bild 1, S. 18). Sie sind vom Schaltzeitpunkt $t_x$ abhängig; maximale lineare Mittelwerte erhält man für $t_x$ = Zeitpunkt des Nulldurchgangs.

Die Zeiger-Meßanordnung stellt ein elektrisches Integrationsgerät dar, dessen Synchronschalter (mechan. Gleichrichter) von der Rotorspannung eines Drehphasenschiebers (festgebremster Drehstrommotor) phasen-




*U* Meßspannung
*S* Synchronschalter
*D* Drehphasenschieber
*R* Meßbereichwiderstand
*G* Galvanometer

Bild 127
Zeiger-Meßanordnung

abhängig synchron gesteuert wird. Da sich nämlich mit der Winkelstellung der Rotorwicklung gegenüber der Statorwicklung die Phasenlage der Rotorspannung gegenüber der der Statorspannung einstellen läßt, kann, wenn zwischen Stator- und Meßspannung starre Phasenlage besteht, auch jede beliebige Phase zwischen den Schaltungen des Sychronschalters und der Meßspannung eingestellt, also die Kurve abgetastet werden.

Für Verlustmessungen verbindet man die Messung des Strom-Augenblickswertes mit der des Spannungs-Mittelwertes.

**Messungen von linearen Mittelwerten.** Legt man die Zeiger-Meßanordnung an die Klemmen eines Verbrauchers oder einer Spannungsquelle, so ist unter der Voraussetzung, daß keine geradzahligen Teilschwingungen auftreten, der Zeigerausschlag proportional dem linearen Mittelwert der Meßspannung:

$$\bar{u} = \frac{1}{T/2} \int_{t_x}^{t_x + T/2} u \, \mathrm{d}t = \frac{4}{T} \int_{t_x}^{} u \, \mathrm{d}t.$$

Damit bei Sinusform der höchste gemessene Wert $U_{\mathrm{Anz}_{\max}}$ dem Effektivwert der Meßspannung $U$ entspricht, wird der Meßbereichwiderstand so gewählt, daß ein Spannungsmeßwert $U_{\mathrm{Anz}} = 1{,}11\ \bar{u}$ angezeigt wird:

$$U_{\mathrm{Anz}} = \frac{4{,}44}{T} \int_{t_x}^{} u \, \mathrm{d}t.$$

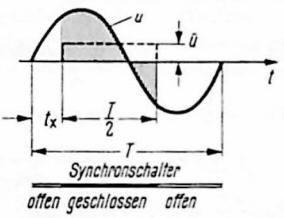



Bild 128
Linearer Mittelwert $\bar{u}$ der Spannung $u$, gebildet zwischen $t_x$ und $t_x + T/2$

Zur Ermittlung des linearen Mittelwertes eines Stromes $I$ legt man die Meßanordnung an einen äußeren Nebenwiderstand und nutzt zur Anzeige den von $I$ an diesem Widerstand hervorgerufenen Spannungsabfall aus. Der Strommeßwert wird:

$$I_{\mathrm{Anz}} = 1{,}11\ \bar{I} = \frac{4{,}44}{T} \int_{t_x}^{} i \, \mathrm{d}t.$$

**Messungen von Augenblickswerten.** Um mit der Zeiger-Meßanordnung Augenblickswerte zur Daueranzeige bringen zu können, muß die Meßfunktion zunächst differenziert und dann die Differentialfunktion integriert werden.

Zur Differentiation eines Stromes $I$ dient eine sog. Differentiationsdrossel (praktisch verlustlose Gegeninduktivität), deren Primärwicklung von $I$ durchflossen wird und deren Sekundärwicklung an der Zeiger-Meßanordnung liegt (vgl. Bild 131). Ihre Sekundärspannung ist dem Differentialquotienten des Primärstromes verhältnisgleich:

$$u_{\mathrm{D}} = M \frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}.$$

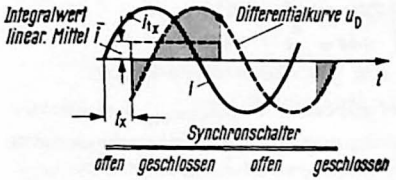



Bild 129
Augenblickswert $i_{t_x}$
des Stromes $i$ zur Zeit $t_x$

Die Integration von $u_D$ führt wie bei der Mittelwertmessung die Vektor-Meßanordnung durch.

Es ist: $$\bar{u} = \frac{4}{T} \int_{t_x} u_D \, dt = \frac{4}{T} \int_{t_x} M \frac{di}{dt} \, dt = \frac{4}{T} M \, i_{t_x}.$$

Da $f = \frac{1}{T}$ und $\omega = 2\pi f$ ist, kann man schreiben:

$$\bar{u} = 4 f M \, i_{t_x} = \frac{4}{2\pi} \omega M \, i_{t_x} \quad \text{und} \quad \frac{\bar{u}}{\omega M} = \bar{I} = \frac{4}{2\pi} i_{t_x}.$$

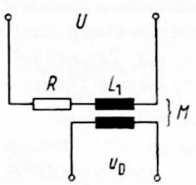
Mit $\frac{2\pi}{4} = 1{,}11\sqrt{2}$ erhält man: $\bar{I} = \frac{1}{1{,}11\sqrt{2}} i_{t_x}$.

Der angezeigte Strommeßwert $I_{Anz}$ hat wegen der entsprechenden Kalibrierung zu dem Augenblickswert $i_{t_x}$ die Beziehung:

$$I_{Anz} = \frac{i_{t_x}}{\sqrt{2}}.$$

Zur Differentiation einer Spannung verwendet man einen Differentiationskreis nach Bild 130. Mit $R \gg \omega L_1$ ist die Spannung an der Drossel dem Differentialquotienten der Meßspannung $U$ verhältnisgleich:

$$u_D = \frac{M}{R} \cdot \frac{du}{dt}.$$




$U$ Meßspannung
$R$ Widerstand
$L_1$ Induktivität der Primärwicklung
$M$ Gegeninduktivität
$u_D$ Sekundärspannung

Bild 130 Differentiationskreis
zum Messen von Spannungs-Augenblickswerten

Nach der Integration gilt:

$$\bar{u} = \frac{4}{2\pi} \cdot \frac{\omega M}{R} u_{t_x} = \frac{1}{1{,}11\sqrt{2}} \cdot \frac{\omega M}{R} u_{t_x} \quad \text{und} \quad U_{\text{Anz}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\omega M}{R} u_{t_x}.$$

Zwischen dem von der Meßanordnung entsprechend ihrer Kalibrierung angezeigten Spannungsmeßwert $U'_{\text{Anz}}$ und dem Augenblickswert $u_{t_x}$ besteht die Beziehung:

$$U'_{\text{Anz}} = \frac{u_{t_x}}{\sqrt{2}}.$$

**Verlustmessungen.** Zwei nach Bild 131 geschaltete Zeiger-Meßanordnungen zeigen bei gleichphasiger Abstimmung der Synchronschalter gleichzeitig den Augenblickswert des Stromes und den linearen Mittelwert der Spannung eines Verbrauchers an.

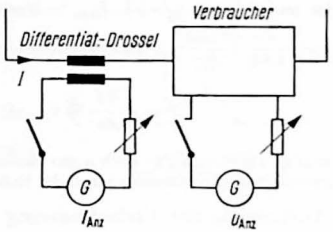



Bild 131
Schaltung von Zeiger-Meßanordnungen für Verlustmessungen

Bei sinusförmigem Strom- und Spannungsverlauf ergeben die Meßwerte $U_{\text{Anz}} = f(I_{\text{Anz}})$ für eine halbe Periode eine Halb-Ellipse (Bild 132), die die Abszisse beim Wert des Wirkstromes $I_w = I_{\text{Anz}_{\text{max}}} \cos\varphi$ $(U_{\text{Anz}} = 0)$ und die Ordinate beim Wert der Wirkspannung $U_w = U_{\text{Anz}_{\text{max}}} \cos\varphi$ $(I_{\text{Anz}} = 0)$ schneidet. Mit $I_w$ bzw. $U_w$ und dem Höchstwert der Spannungs- bzw. Strommeßwerte, also $U_{\text{Anz}_{\text{max}}}$ bzw. $I_{\text{Anz}_{\text{max}}}$, läßt sich die vom Verbraucher aufgenommene Leistung berechnen:

$$P = I_w U_{\text{Anz}_{\text{max}}} = U_w I_{\text{Anz}_{\text{max}}}.$$

Wie ersichtlich, braucht zur Berechnung von $P$ nicht die ganze Kurve aufgenommen zu werden, sondern es genügt, jeweils zwei entsprechende Meßwerte zu ermitteln.

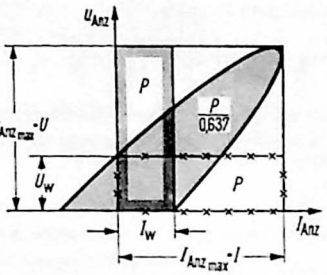



Bild 132 Halbe Leistungsschleife

Da

$$P = \frac{2}{T}\int_0^{T/2} i\,u\,\mathrm{d}t$$

ist und sich mit $i_{t_x} = \sqrt{2}\cdot I_{Anz}$ (s. Messungen von Augenblickswerten) für $i$ sowie mit $u = \frac{T}{4{,}44}\,\frac{\mathrm{d}U_{Anz}}{\mathrm{d}t}$ (s. Messungen linearer Mittelwerte)

$$P = \frac{2\sqrt{2}}{4{,}44}\oint I_{Anz}\,\mathrm{d}U_{Anz} = 0{,}637\oint I_{Anz}\,\mathrm{d}U_{Anz}$$

ergibt, kann man also auch unter Berücksichtigung des Faktors 0,637 den Leistungsmeßwert durch Planimetrieren der halben Leistungsschleife ermitteln.

Anwendung der Verlustmessung s. S. 233.

## Zeiger-Meßanordnung mit Gleichrichter-Drehspulinstrument und Dreheiseninstrument

Messungen von maximalen linearen Mittelwerten und von Effektivwerten sinusförmiger oder oberschwingungshaltiger Spannungen und Ströme sowie von Grund -und Oberschwingungs-Effektivwerten dieser Größen, der Wirk- und Blindkomponenten und der Verlust- und Phasenwinkel lassen sich mit der Zeiger-Meßanordnung nach Bild 133 durchführen. Die Eingangsgrößen $U_1$ und $U_2$ kann man, wie für die Schaltung in Bild 131 angegeben, einerseits direkt am Verbraucher und andererseits über eine Differentiationsdrossel $\left(u_2 = M\,\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}\right)$ abnehmen. Man kann aber auch an Stelle der Differentiationsdrossel einen ohmschen Widerstand

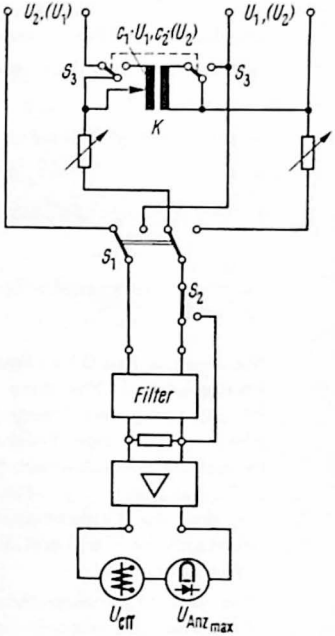



Bild 133 Zeiger-Meßanordnung
$U_1$, $(U_1)$ Spannung am Verbraucher
$U_2$, $(U_2)$ Spannung entsprechend Verbraucherstrom
$c_1 \cdot U_1$, $c_2 \cdot (U_2)$ Teilspannung
$S_1$, $S_2$, $S_3$ Schalter
$K$ Blindkomponenten-Kompensator

($u_2 = R\,i$) vorsehen. Während $U_1$ also die Spannung am Verbraucher ist, entspricht $U_2$ dem Strom $I$ des Verbrauchers. Mit Hilfe des Schalters $S_1$ werden die Eingangsgrößen nacheinander, je nach Stellung des Schalters $S_2$ über auswechselbare Filter (mit denen sogar eine Harmonische Analyse möglich ist) oder direkt, dem Meßverstärker zugeführt, dessen Ausgang an den beiden Anzeigeinstrumenten liegt.

**Messungen von maximalen linearen Mittelwerten.** Diese Messungen werden ohne Zwischenschaltung eines Filters vorgenommen. Unter der Voraussetzung, daß keine geradzahligen Teilschwingungen auftreten, zeigt das Gleichrichter-Drehspulinstrument unmittelbar die maximalen linearen Mittelwerte an:

$$U_{1\,\mathrm{Anz}_{max}} = 1{,}11\,\bar{u}_{1_{max}}, \qquad U_{2\,\mathrm{Anz}_{max}} = 1{,}11\,\bar{u}_{2_{max}}.$$

**Messungen von Effektivwerten.** Das Dreheiseninstrument zeigt unmittelbar die Effektivwerte an;

bei sinusförmigen oder oberschwingungshaltigen Größen ohne Filter:

$$U_{1\,\mathrm{eff}},\quad U_{2\,\mathrm{eff}};$$

bei sinusförmigen Größen mit Grundschwingungsfilter:

$$U_{1_g\,\mathrm{eff}} = U_{1\,\mathrm{eff}},\quad U_{2_g\,\mathrm{eff}} = U_{2\,\mathrm{eff}};$$

bei oberschwingungshaltigen Größen mit Grundschwingungsfilter:

$$U_{1_g\,\mathrm{eff}},\quad U_{2_g\,\mathrm{eff}};$$

bei oberschwingungshaltigen Größen mit Oberschwingungsfilter:

$$U_{1_\nu\,\mathrm{eff}},\quad U_{2_\nu\,\mathrm{eff}}.$$

**Messungen der Wirk- und Blindkomponenten und der Verlust- und Phasenwinkel.** Für diese Messungen ist mit dem Schalter $S_3$ über den Blindkomponenten-Kompensator $K$ (phasenreiner Dekaden-Spannungsteiler) von $U_1$ eine Teilspannung $c_1 U_1$ entgegen $U_2$ und nach dem erforderlichen Umklemmen der Eingangsgrößen von ($U_2$) eine Teilspannung $c_2$ ($U_2$) entgegen ($U_1$) zu schalten. Stellt man den Kompensator stets so ein, daß das Dreheiseninstrument ein Minimum $\Delta U_{\min}$ anzeigt, dann lassen sich die Wirk- und Blindkomponenten und die Verlust- und Phasenwinkel berechnen.

Nach den Zeigerdiagrammen in Bild 134 gilt (bei sinusförmigen Größen ohne und bei oberschwingungshaltigen Größen mit entsprechendem Filter) unter

| Verwendung einer Differentiationsdrossel: | Verwendung eines ohmschen Widerstandes: |
|---|---|
| $U_2 - c_1 U_1 = \Delta U_{1\,\min}$ | |
| $\Delta U_{1\,\min} = U_2 \cdot \sin\delta$ | $\Delta U_{1\,\min} = U_2 \cdot \cos\delta$ |
| $= U_2 \cdot \cos\varphi$ | $= U_2 \cdot \sin\varphi$ |
| $= \omega L \cdot I_w$ | $= R \cdot I_b$ |
| $c_1 U_1 = U_2 \cdot \cos\delta$ | $c_1 U_1 = U_2 \cdot \sin\delta$ |
| $= U_2 \cdot \sin\varphi$ | $= U_2 \cdot \cos\varphi$ |
| $= \omega L \cdot I_b$ | $= R \cdot I_w$ |
| $\frac{\Delta U_{1\,\min}}{c_1 U_1} = \tan\delta$ | $\frac{c_1 U_1}{\Delta U_{1\,\min}} = \tan\delta$ |

| Verwendung einer Differentiationsdrossel | Verwendung eines ohmschen Widerstandes |
|---|---|
| $(U_1) - c_2\,(U_2) = \Delta\, U_{2\,\min}$ | |
| $\Delta U_{2\,\min} = (U_1) \cdot \sin\delta = (U_1) \cdot \cos\varphi = U_{1\,w}$ | $\Delta U_{2\,\min} = (U_1) \cdot \cos\delta = (U_1) \cdot \sin\varphi = U_{1\,b}$ |
| $c_2\,(U_2) = (U_1) \cdot \cos\delta = (U_1) \cdot \sin\varphi = U_{1\,b}$ | $c_2\,(U_2) = (U_1) \cdot \sin\delta = (U_1) \cdot \cos\varphi = U_{1\,w}$ |
| $\frac{\Delta U_{2\,\min}}{c_2\,(U_2)} = \tan\delta$ | $\frac{c_2\,(U_2)}{\Delta U_{2\,\min}} = \tan\delta$ |

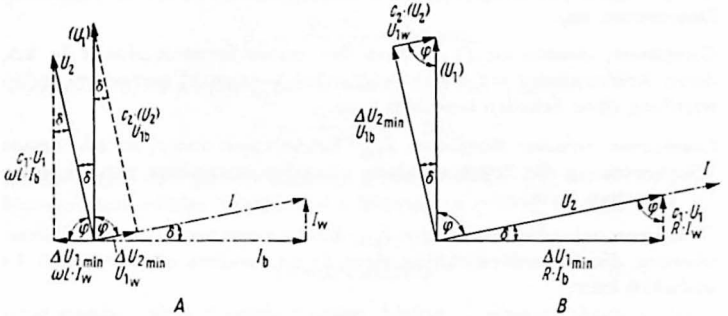



Bild 134 Zeigerbilder

# IX. Wandler

## Begriffserklärungen

(Weiteres s. VDE 0414)

*Bürde* (*Betriebsbürde*) $Z$ bzw. $Y$: Bei Stromwandlern der Scheinwiderstand in Ω, bei Spannungswandlern der Scheinleitwert in S der sekundär angeschlossenen Geräte einschließlich der Zuleitungen.

*Fehlwinkel* $\delta_i$ bzw. $\delta_u$: Phasenverschiebung zwischen $I_2$ und $I_1$ bei Stromwandlern bzw. zwischen $U_2$ und $U_1$ bei Spannungswandlern in Winkelminuten. Der Fehlwinkel wird positiv gerechnet, wenn die sekundäre Größe der primären voreilt.

*Grenzleistung:* Scheinleistung eines Spannungswandlers aus $U_{2n} \cdot I_2$ in VA, wobei $I_2$ ohne Rücksicht auf die Klassengenauigkeit der höchste thermisch (entsprechend den Grenz-Übertemperaturen) gerade noch zulässige Dauerstrom ist.

*Grenzstrom, dynamischer,* $I_{dyn}$: Wert der ersten Stromamplitude in kA, deren Kraftwirkung ein Stromwandler bei kurzgeschlossener Sekundärwicklung ohne Schaden aushalten kann.

*Grenzstrom, primärer thermischer,* $I_{1th}$: Effektivwert von $I_1$ in kA, dessen Wärmewirkung die Primärwicklung eines Stromwandlers ohne Schaden 1 s aushalten kann.

*Grenzstrom, sekundärer thermischer,* $I_{2th}$: Effektivwert von $I_2$, dessen Wärmewirkung die Sekundärwicklung eines Stromwandlers ohne Schaden 1 s aushalten kann.

*Nennbürde* $Z_n$ bzw. $Y_n$: Bürde von Strom-bzw. Spannungswandlern, auf die sich die Bestimmungen über die Fehlergrenzen beziehen (Bürdenleistungsfaktor $\cos \beta = 0{,}8$).

*Nennleistung (Scheinleistung)*: Bei Stromwandlern $Z_n \cdot I_{2n}^2$ in VA, bei Spannungswandlern $Y_n \cdot U_{2n}^2$ in VA.

*Nennspannung* $U_{1n}$ (primär) und $U_{2n}$ (sekundär): Auf dem Leistungsschild eines Spannungswandlers angegebene Spannungswerte in V.

*Nennstrom* $I_{1n}$ (primär) und $I_{2n}$ (sekundär): Auf dem Leistungsschild eines Stromwandlers angegebene Stromwerte in A.

*Nennübersetzung* $K_n$: Übersetzungsverhältnis $I_{1n} : I_{2n}$ bei Stromwandlern und $U_{1n} : U_{2n}$ bei Spannungswandlern. Angabe: Ungekürzter Bruch, z.B. 100/5 A, 6000/100 V.

*Nennüberstromziffer* $n$ (bei Stromwandlern): Vielfaches von $I_{1n}$, bei dem $F_i$ bei Nennbürde $-10\%$ beträgt. Angabe z.B.: $n < 5$ (für Meßkern), $n > 10$ (für Relaiskern).

*Reihenspannung* $U_r$: Diejenige genormte Spannung, für die die Isolation (gemäß VDE 0111) bemessen ist. Die Reihe ist gekennzeichnet durch den Zahlenwert von $U_r$. Bei Anlagen normaler Ausführung, d.h. im Gegensatz zu probeweise zugelassenen Anlagen, wird der die Reihe bezeichnende Zahlenwert neuerdings ergänzt mit dem Kennbuchstaben N (z.B. Reihe 30 N) im Falle voller Isolation und mit den Kennbuchstaben NE (z.B. Reihe 380 NE) im Falle verringerter Isolation (bei starrer Sternpunkterdung).

*Spannungsfehler* $F_u$: Abweichung des Wertes $U_2 \cdot K_n$ von $U_1$ in %:

$$F_u = \frac{U_2 K_n - U_1}{U_1} \cdot 100.$$

*Stromfehler* $F_i$: Abweichung des Wertes $I_2 \cdot K_n$ von $I_1$ in %:

$$F_i = \frac{I_2 K_n - I_1}{I_1} \cdot 100.$$

*Überstromziffer* (bei Stromwandlern): Vielfaches von $I_{1n}$, bei dem $F_i$ bei Betriebsbürde infolge Sättigung des Eisenkerns $-10\%$ beträgt.

## Stromwandler

Stromwandler sind Transformatoren kleiner Leistung, deren Primärwicklungen im Zuge der Leitung liegen und deren Sekundärwicklungen über die angeschlossenen Meßgeräte, Zähler, Relais oder Regler praktisch kurzgeschlossen sind. Sie trennen Meß- und Schutzkreise von der primärseitigen Spannung und schützen die Geräte entsprechend dem Überstromverhalten der Wandler vor Überlastung.

Stromwandler können mehrere Sekundärwicklungen mit magnetisch völlig voneinander getrennten Kernen gleicher oder verschiedener Kennlinien haben. Sie können also z.B. mit zwei Meßkernen verschiedener Klassengenauigkeit oder auch mit Meß- und Schutzkernen (verschiedene Überstromziffern) ausgeführt werden.

Als *Meßwandler* haben sie die Aufgabe, in ihrem Arbeitsbereich den zu messenden Strom verhältnis- und phasengleich auf bequem meßbare sekundäre Ströme zu übersetzen (genormte $I_{1n}$ und $I_{2n}$ s. Tafel 58). Ihre Meßkerne (Zählkerne) sind aus Spezialeisen, um eine möglichst kleine Nennüberstromziffer ($n < 5$ bzw. $n < 10$), also schon bei verhältnismäßig kleinem Überstrom eine Begrenzung des Sekundärstromes, zu erzielen. — Als *Schutzwandler* werden sie hauptsächlich zum Anschluß von Schutzkreisen, d.h. von Schutzrelais für Generatoren, Transformatoren und Kabel, benutzt und dürfen auch bei Überströmen nur begrenzte Übersetzungsfehler aufweisen. Aus diesem Grund sind ihre Schutzkerne meist aus anderen Eisensorten und haben eine große Nennüberstromziffer ($n > 5$ bzw. $n > 10$). Dadurch wird erreicht, daß der Sekundärstrom bis zu einer größeren Überlastung als bei Meßkernen proportional mit dem Primärstrom anwächst und dann erst begrenzt wird.

**Tafel 58** Genormte primäre Nennströme $I_{1n}$ von Stromwandlern (VDE 0414/5.58) (Bevorzugte Werte hervorgehoben)

| Nicht umschaltbar | 1:2 umschaltbar | 1:2:4 umschaltbar | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Reihe | | | | | |
| 0,5 bis 45 N[1]) | | 60 N[1]) | 110 N[1]), 150 N[1]) | 220 N[1]) | 380 NE[1]) |
| $I_{1n}$ in A | | | | | |
| 5 100 1000 10000 | 2× 5 2×100 | 2× 50 | 4× 50 | 4×100 | 4×300 |
| 10 150 1500 15000 | 2×10 2×150 | 2× 75 | 4×100 | 4×150 | |
| 15 200 2000 20000 | 2×15 2×200 | 2×100 | 4×150 | 4×300 | |
| 20 300 3000 30000 | 2×25 2×300 | 2×150 | | | |
| 30 400 4000 40000 | 2×50 2×400 | 2×200 | | | |
| 50 600 6000 60000 | 2×75 | 2×300 | | | |
| 75 800 8000 80000 | | | | | |

Genormte sekundäre Nennströme $I_{2n}$ von Stromwandlern (VDE 0414/5.58):

Reihe 0,5 bis 45 N[1])
5 A oder 1 A[2])

Reihe 60 N[1]) bis 220 N[1]) und 380 NE[1])
für alle Kerne 5 A oder 1 A[2]), für Schutzkerne auch 2×5 A oder 2×1 A[2]).

[1]) vgl. S. 179 („Reihenspannung $U_r$").
[2]) Bei langen Meßleitungen.

Die *Überstromziffer* von Stromwandlern ist nur dann etwa gleich der Nennüberstromziffer, wenn die Bürde gleich der Nennbürde ist. Wird von der Nennbürde abgewichen, so ändert sich die Überstromziffer annähernd umgekehrt proportional (z. B. statt $n = 5$ bei 30 VA etwa $n = 10$ bei 15 VA). Es empfiehlt sich daher, möglichst nahe der Nennbürde zu arbeiten. Unter Umständen muß man die Bürde durch Vorschalten eines ohmschen und nötigenfalls eines induktiven Widerstandes ergänzen.

Das *Übersetzungsverhältnis* von Stromwandlern kann bei Einleiterwandlern (s. Tafel 64, S. 187) nur geändert werden, wenn die Sekundärwicklung entweder Anzapfungen hat oder unterteilt ist, um die einzelnen Wicklungen in Reihe oder parallel schalten zu können. In beiden Fällen ändert sich aber die Leistung des Wandlers mit dem Quadrat des Umschaltverhältnisses (z. B. 1000/5 A, Kl. 1/30 VA; 500/5 A, Kl. 1/7,5 VA). Wickelwandler (s. Tafel 64, S. 189) können sowohl eine in mehrere Spulen

**Tafel 59** Genormte Nennleistungen[1]) und Nennüberstromziffern $n$ von Stromwandlern (VDE 0414/5.58). (Bevorzugte Werte hervorgehoben)

| | Reihe | Klasse | Nennleistung in VA | Nennüberstrom-ziffer |
|---|---|---|---|---|
| Meß- und Zählkerne | 0,5 bis 45 N | 0,2<br>0,5<br>1[2]) | 5 10 **15**<br>5 10 **15 30**<br>5 10 **15 30 60** | $n < 10$ oder $n < 5$ |
| | | 0,2 G<br>0,5 G<br>1 G[2]) | 5 **10**<br>5 10 **15**<br>5 10 **15 30** | $n < 20$ oder $n < 10$ |
| | 60 N bis 220 N<br>380 N E | 0,2[3])<br>0,5 | 15<br>30 | $n < 10$ oder $n < 5$ |
| | | 0,2 G[3])<br>0,5 G | 15<br>30 | $n < 20$ oder $n < 10$ |
| Schutzkerne | 0,5 bis 45 N | 1 oder 3<br>1 G oder 3 G | 5 10 15 30 60<br>5 10 15 30 | $n > 10$ oder $n > 5$ |
| | 60 N bis 220 N<br>380 N E | 1<br>1 G | 30 60<br>30 60 | $n > 20$ oder $n > 10$ |

[1]) Die Nennleistungen gelten nur für Nennfrequenz. Abweichungen von der Nennfrequenz bedingen etwa proportionale Abweichungen von der Nennleistung.

[2]) Nicht für Verrechnungszwecke.

[3]) Wandler der Kl. 0,2 mit $n < 10$ bzw. Wandler der Kl. 0,2 G mit $n < 20$ sollen so bemessen sein, daß sie bei Belastung mit doppelter Nennleistung noch die Fehlergrenzen der Kl. 0,5 bzw. 0,5 G bei $n < 5$ bzw. $n < 10$ einhalten.

**Tafel 60** Zulässige Dauerbelastung bei Nennbürde $Z_n$ (VDE 0414/5.58)

| Klasse | Zulässige Dauerbelastung |
|---|---|
| 0,1 bis 3<br>0,1 G bis 3 G | $1{,}2 \cdot I_{1n}$<br>$2{,}0 \cdot I_{1n}$ |

unterteilte Sekundärwicklung als auch eine in mehrere Spulen unterteilte Primärwicklung haben, also sekundär oder primär umschaltbar sein. Von der sekundären Umschaltung wird jedoch wegen der damit zwangsläufig verbundenen Leistungsminderung kaum Gebrauch gemacht. Bei primärer Umschaltung ändert sich die Leistung des Wandlers nicht. Für Wickelwandler sind als Umschaltverhältnisse 1:2 (zwei gleiche Spulen) und 1:2:4 (vier gleiche Spulen) genormt.

**Tafel 61** Zulässige Stromfehler $F_i$ und Fehlwinkel $\delta_i$ von Stromwandlern (VDE 0414/5.58[1])

| Klasse | Stromfehler $\pm F_i$ in % bei | | | | | | | Fehlwinkel $\pm \delta_i$ in Minuten bei | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $2{,}0 \cdot I_{1n}$ | $1{,}2 \cdot I_{1n}$ | $1{,}0 \cdot I_{1n}$ | $0{,}5 \cdot I_{1n}$ | $0{,}2 \cdot I_{1n}$ | $0{,}1 \cdot I_{1n}$ | $0{,}05 \cdot I_{1n}$ | $2{,}0 \cdot I_{1n}$ | $1{,}2 \cdot I_{1n}$ | $1{,}0 \cdot I_{1n}$ | $0{,}5 \cdot I_{1n}$ | $0{,}2 \cdot I_{1n}$ | $0{,}1 \cdot I_{1n}$ | $0{,}05 \cdot I_{1n}$ |
| 0,1 | — | 0,1 | 0,1 | — | 0,2 | 0,25 | — | — | 5 | 5 | — | 8 | 10 | — |
| 0,2 | — | 0,2 | 0,2 | — | 0,35 | 0,5 | — | — | 10 | 10 | — | 15 | 20 | — |
| 0,5 | — | 0,5 | 0,5 | — | 0,75 | 1,0 | — | — | 30 | 30 | — | 40 | 60 | — |
| 1 | — | 1,0 | 1,0 | — | 1,5 | 2,0 | — | — | 60 | 60 | — | 80 | 120 | — |
| 3 | — | — | 3,0 | 3,0 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 0,1 G | 0,1 | — | 0,1 | — | 0,2 | 0,25 | 0,4 | 5 | — | 5 | — | 8 | 10 | 15 |
| 0,2 G | 0,2 | — | 0,2 | — | 0,35 | 0,5 | 0,75 | 10 | — | 10 | — | 15 | 20 | 30 |
| 0,5 G | 0,5 | — | 0,5 | — | 0,75 | 1,0 | 1,5 | 30 | — | 30 | — | 40 | 60 | 90 |
| 1 G | 1,0 | — | 1,0 | — | 1,5 | 2,0 | — | 60 | — | 60 | — | 80 | 120 | — |
| 3 G | — | — | 3,0 | 3,0 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |

[1]) Die Fehlergrenzen gelten, Nennfrequenz vorausgesetzt, bei Wandlern der Klassen 0,1 bis 1 und 0,1 G bis 1 G für Bürden zwischen 1/4 und 1/1 Nennbürde und bei Wandlern der Klassen 3 und 3 G für Bürden zwischen 1/2 und 1/1 Nennbürde (sekundärer Leistungsfaktor $\cos\beta = 0{,}8$).

Bei Wandlern der Klassen 0,1 bis 1 und 0,1 G bis 1 G mit einer größeren Nennleistung als 60 VA müssen die Fehlergrenzen von derjenigen Bürde an eingehalten werden, die bei Nennstrom eine Leistung von 15 VA ergibt.

Entspricht bei Nennstrom die Bürde, bei der die Messung durchzuführen ist, für Stromwandler mit $I_{2n} = 1$ oder 5 A einer kleineren Leistung als 3,75 VA, so tritt an Stelle des Bürdenleistungsfaktors $\cos\beta = 0{,}8$ der Leistungsfaktor $\cos\beta = 1$.

Zweibereichwandler, das sind Stromwandler für gleichzeitig $I_{2n} = 5$ A und 1 A ohne Umschaltung, halten die Fehlergrenzen für jeweils gleiche Nennbürde ebenfalls ein.

Stromwandler werden entsprechend ihrer Genauigkeit, bedingt durch das verwendete Kerneisen und die Ausführung der Wicklungen, in *Klassen* eingeteilt, die durch Klassenzeichen gekennzeichnet sind (s. Tafel 61). Den Klassenzusatz G (Großbereich) erhalten sie, wenn sie für zweifachen Nennstrom ausgelegt sind, so daß sie z. B. in Netzen mit zwei Leitungssystemen verwendet werden können, in denen beim Ausfall einer der beiden Leitungen die gesamte Last sofort vom zweiten System einschließlich der eingebauten Wandler übernommen werden muß.

**Tafel 62** Prüfwechselspannungen (VDE 0414 b/12.62) und Prüfstoßspannungen (VDE 0111/2.61) für Strom- und Spannungswandlerprüfungen

| Reihe | Stückprüfung | | Typenprüfung | |
|---|---|---|---|---|
| | Prüfwechselspannungen (Effektivwerte) für die | | Prüfstoßspannungen | |
| | Wicklungsprüfung von Stromwandlern und allpolig isolierten Spannungswandlern | Windungsprüfung von Spannungswandlern | Unterer [1]) Stoßpegel | Oberer Stoßpegel |
| | | | Nenn-Stehstoßspannung 1/50 µs | Nenn-Stehstoßspannung (Vollwelle bzw. abgeschnittene Welle) 1/50 µs |
| | kV | kV | kV | kV |
| 0,5 | 3 | 2 | — | — |
| 1 N [2]) | 10 | 3,5 | 20 | 23 |
| 3 N [2]) | 25 | 10 | 45 | 52 |
| 6 N [2]) [3]) | 35 | 22 | 60 | 70 |
| 10 N [2]) | 40 | 30 | 75 | 85 |
| 15 N [2]) [4]) | 55 | 40 | 95 | 110 |
| 20 N [2]) | 65 | 50 | 125 | 145 |
| 30 N [2]) | 85 | 70 | 170 | 195 |
| 45 N [2]) | 120 | 95 | 250 | 290 |
| 60 N [2]) | 150 | 140 | 325 | 375 |
| 110 N [2]) | 260 | 230 | 550 | 630 |
| 150 N [2]) | 350 | 325 | 750 | 860 |
| 220 N [2]) | 505 | 460 | 1050 | 1200 |
| 380 NE [2]) | 750 | 680 | 1425 | 1640 |

[1]) Für probeweise zugelassene Anlagen, Kennbuchstabe S, ab 20 kV geringere Werte.
[2]) Vgl. S. 179, „Reihenspannung $U_r$".
[3]) Nur für geschlossene und gekapselte Anlageteile (Schutzarten P 30 und P 44 nach DIN 40050) zulässig.
[4]) Nur für Spannungswandler in Bahnanlagen.

Die *Spannungsfestigkeit* von Wandlern muß durch

Wicklungsprüfung (Stückprüfung)
Windungsprüfung (Stückprüfung)
Stoßspannungsprüfung (Typenprüfung)

nachgewiesen werden (s. Tafel 62). Die Wicklungs- und die Windungsprüfung sind nach VDE 0414, „Regeln für Wandler", mit Wechselspannung auszuführen und die Stoßspannungsprüfung nach VDE 0111, „Leitsätze für die Bemessung und Prüfung der Isolation elektrischer Anlagen für Wechselspannungen von 1 kV und darüber".

Zur *Windungsprüfung* von Stromwandlern wird bei offener Sekundärwicklung (Primärwicklung) die Primärwicklung (Sekundärwicklung) mit Nennstrom erregt. Nähere Anweisungen enthält VDE 0414.

Die sekundären Klemmen von Stromwandlern dürfen niemals offen sein, denn es können, insbesondere bei großen Strömen und leistungsstarken Kernen, gefährlich hohe Spannungen auftreten. Stromwandler, an deren Sekundärklemmen im offenen Zustand die Spannung $250 \cdot \sqrt{2}$ V gegen Erde erreicht oder überschreitet, sind mit einem Warnschild versehen. Alle nicht an Spannung liegenden, der Berührung zugänglichen Teile eines Wandlers müssen fest an Erde gelegt werden. Die Wandler haben daher Erdungsschrauben, die durch das Erdungszeichen ⏚ gekennzeichnet sind. Außerdem ist eine Klemme der Sekundärwicklung (bei Stromwandlern normalerweise *k* bzw. *1k*, *2k* usw.) zu erden (vgl. S. 154).

Stehen abweichend davon Gehäuseteile oder Kerne betriebsmäßig unter Spannung, so sind sie durch einen Blitzpfeil ↯ nach DIN 40006 gekennzeichnet.

**Tafel 63** Bezeichnung der Anschlußklemmen von Stromwandlern (VDE 0414/5.58)

| Primär-Anschlüsse | | | | Sekundär-Anschlüsse | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| nicht umschaltbar | umschaltbar (Reihen- oder Parallelschaltung) | mehrere selbständige Wicklungen | mit Anzapfungen | ein Kern | mehrere Kerne | mit Anzapfungen |
| K<br>und<br>L | $K_a$, $K_b$<br>und<br>$L_a$, $L_b$ | AK, BK, ...<br>und<br>AL, BL, ... | K<br>und<br>$L_1$, $L_2$,... | *k*<br>und<br>*l* | *1k*, *2k*, ...[1]<br>und<br>*1l*, *2l*, ... | *k*<br>und<br>$l_1$, $l_2$, ... |

[1]) Kennziffer *1* wird dem Kern der höheren Genauigkeitsklasse zugeteilt. Bei mehreren Kernen gleicher Klasse bekommt der Meßkern die kleinere Ziffer.

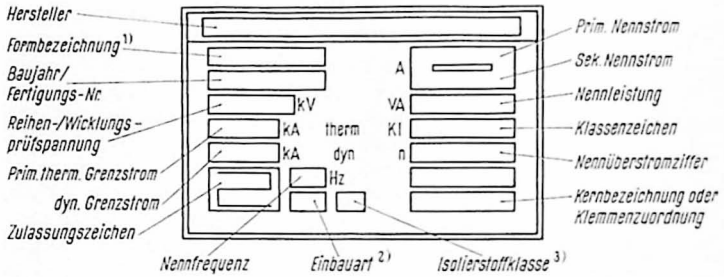



Bild 135 Leistungsschild für Stromwandler mit den nach VDE erforderlichen Angaben

[1]) Formbezeichnung für Siemens-Strom- und -Spannungswandler:

| Erster Buchstabe bzw. Buchstabengruppe: Meßgröße | | Zweiter Buchstabe: Bauart | |
|---|---|---|---|
| A | Stromwandler | U | Ungeschützt, ohne Gehäuse |
| V | Spannungswandler | G | Geschützt, mit Gehäuse |
| AV | Kombinierte Strom- und Spannungswandler mit induktivem Spannungsteil | T | Topfwandler |
| | | K | Kopfwandler |
| | | D | Durchführungswandler |
| AVC | Kombinierte Strom- und Spannungswandler mit kapazitivem Spannungsteil | E | Einleiterwandler (primär), also Schienen- oder Stabwandler |
| | | S | Stützerwandler |
| | | Z | Zangenwandler |

| Dritter Buchstabe: Isolierung | | Zusätzliche Zeichen | |
|---|---|---|---|
| K | Kunststoff (Gießharz) | F | Für Freiluftanlagen |
| T | Trockenisolierung (luft- oder lackisolierter Faserstoff) | e | Mit erhöhter Sicherheit hinsichtlich Schlagwetterschutz (e voraussetzen) |
| O | Ölfüllung | I | Einpolig isoliert |
| P | Porzellan | II | Zweipolig isoliert |
| Q | Querlochporzellan | III | Dreipolig isoliert |

Die Zahl hinter der Formbezeichnung gibt die Reihenspannung an, z. B Gießharz-Stützerwandler Reihe 10: ASK 10.

[2]) Symbole für Einbauart:
⊥ nur für den Einbau mit Isolatoren nach oben;
⊢ nur für den Einbau mit Isolatoren nach der Seite;
⊤ nur für den Einbau mit Isolatoren nach unten;
F für Freiluftaufstellung.

[3]) Zur Kennzeichnung der Wärmebeständigkeit werden die Isolierstoffe für Wandler in Klassen unterteilt, die bestimmten Grenztemperaturen zugeordnet sind (VDE 0414).

*Zwischenstromwandler* sind Wandler mit kleinem Übersetzungsverhältnis, meist sogar nur 1:1, die einem Hauptstromwandler nachgeschaltet werden. Man führt sie aus mit getrennten Wicklungen zum galvanischen Trennen innerhalb eines Meßkreises oder in Sparschaltung zum Anpassen des Sekundärstromes eines Hauptwandlers an den Nennstrom einer Bürde bzw. zum Herabsetzten einer hohen Überstromziffer von Hauptstromwandlern für den Schutz überstromempfindlicher Geräte. Zu beachten ist, daß die Überstromziffer des Gesamtaggregates — Hauptwandler + Zwischenwandler — kleiner ist als die kleinste Überstromziffer der Einzelwandler und vor allem, daß sich die Fehler der einzelnen Wandler vektoriell addieren.

*Summenstromwandler* haben bis zu zehn getrennte Primärwicklungen, um frequenzgleiche Ströme einer Phase, z.B. bei mehreren Netzabgängen, für die Messung oder Zählung summieren zu können. Fehler der Hauptwandler und des Summenwandlers addieren sich dabei vektoriell.

*Mittelfrequenzstromwandler.* Im allgemeinen entsprechen Meßwandler ihrer Klasse nur in einem begrenzten Nennfrequenzbereich, z. B. bei Netzfrequenz 50 Hz im Bereich 45 bis 60 Hz. Zum Messen bei höheren Frequenzen gibt es aber auch Stromwandler für Frequenzen bis etwa 10000 Hz.

*Kabelumbauwandler.* Zum Erfassen von Erdschlußströmen in Drehstromsystemen oder Strömen in Einzeladern von Mehrleiterkabeln werden Stromwandler mit Schnittbandkern in Gießharzisolierung hergestellt. Sie bestehen aus zwei trennbaren Hälften und können ohne Leitungsunterbrechung um den äußeren Kabelmantel oder bei aufgezweigten Endverschlüssen um die Einzeladern herumgelegt und verschraubt werden. Für die verschiedenen Kabelstärken gibt es die Umbauwandler mit verschiedenen Innendurchmessern. Bei der Erdschlußstromerfassung ist zu beachten, daß der mit dem Kabelmantel verbundene Endverschluß gegen Erde isoliert befestigt sein und die Erdverbindung durch den Wandler hindurch geschleift werden muß.

*Gleichstromwandler.* Die Messung sehr großer Gleichströme durch die Ermittlung des Spannungsabfalls an Widerständen (Shunts) ist mit verschiedenen Nachteilen behaftet (z.B. großer Eigenverbrauch der Widerstände, schwer vermeidbare Temperaturfehler). Es sind deshalb Gleichstromwandler entwickelt worden, die im Prinzip auf einer Kompensation des primären Gleichstromfeldes durch einen Hilfsstrom beruhen. Bei anderen Verfahren nutzt man die Änderung der Permeabilität eines Eisenkernes (Nickeleisen) durch Gleichstromvormagnetisierung aus und

*Zwischenstromwandler* sind Wandler mit kleinem Übersetzungsverhältnis, meist sogar nur 1:1, die einem Hauptstromwandler nachgeschaltet werden. Man führt sie aus mit getrennten Wicklungen zum galvanischen Trennen innerhalb eines Meßkreises oder in Sparschaltung zum Anpassen des Sekundärstromes eines Hauptwandlers an den Nennstrom einer Bürde bzw. zum Herabsetzten einer hohen Überstromziffer von Hauptstromwandlern für den Schutz überstromempfindlicher Geräte. Zu beachten ist, daß die Überstromziffer des Gesamtaggregates — Hauptwandler + Zwischenwandler — kleiner ist als die kleinste Überstromziffer der Einzelwandler und vor allem, daß sich die Fehler der einzelnen Wandler vektoriell addieren.

*Summenstromwandler* haben bis zu zehn getrennte Primärwicklungen, um frequenzgleiche Ströme einer Phase, z. B. bei mehreren Netzabgängen, für die Messung oder Zählung summieren zu können. Fehler der Hauptwandler und des Summenwandlers addieren sich dabei vektoriell.

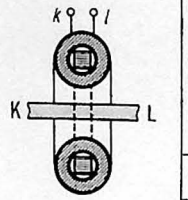
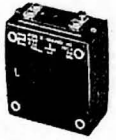
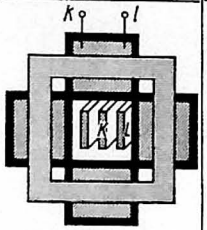
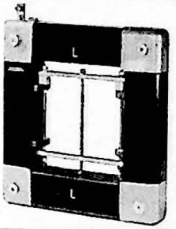
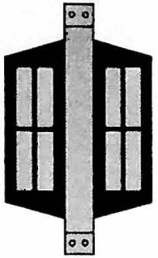
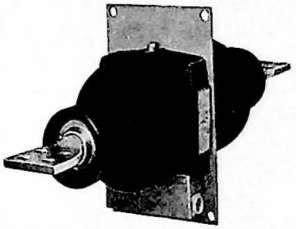
*Mittelfrequenzstromwandler.* Im allgemeinen entsprechen Meßwandler ihrer Klasse nur in einem begrenzten Nennfrequenzbereich, z. B. bei Netzfrequenz 50 Hz im Bereich 45 bis 60 Hz. Zum Messen bei höheren Frequenzen gibt es aber auch Stromwandler für Frequenzen bis etwa 10000 Hz.

*Kabelumbauwandler.* Zum Erfassen von Erdschlußströmen in Drehstromsystemen oder Strömen in Einzeladern von Mehrleiterkabeln werden Stromwandler mit Schnittbandkern in Gießharzisolierung hergestellt. Sie bestehen aus zwei trennbaren Hälften und können ohne Leitungsunterbrechung um den äußeren Kabelmantel oder bei aufgezweigten Endverschlüssen um die Einzeladern herumgelegt und verschraubt werden. Für die verschiedenen Kabelstärken gibt es die Umbauwandler mit verschiedenen Innendurchmessern. Bei der Erdschlußstromerfassung ist zu beachten, daß der mit dem Kabelmantel verbundene Endverschluß gegen Erde isoliert befestigt sein und die Erdverbindung durch den Wandler hindurch geschleift werden muß.

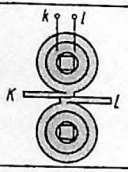
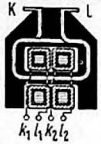
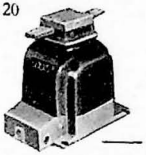
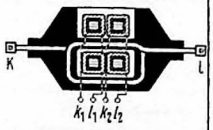
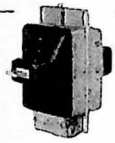
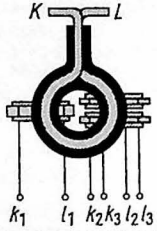
*Gleichstromwandler.* Die Messung sehr großer Gleichströme durch die Ermittlung des Spannungsabfalls an Widerständen (Shunts) ist mit verschiedenen Nachteilen behaftet (z. B. großer Eigenverbrauch der Widerstände, schwer vermeidbare Temperaturfehler). Es sind deshalb Gleichstromwandler entwickelt worden, die im Prinzip auf einer Kompensation des primären Gleichstromfeldes durch einen Hilfsstrom beruhen. Bei anderen Verfahren nutzt man die Änderung der Permeabilität eines Eisenkernes (Nickeleisen) durch Gleichstromvormagnetisierung aus und

Tafel 64

## Bauarten von Stromwandlern

| Prinzip (Schnitt) | Kennzeichnung nach: Isolierung, Wicklungs- od. Bauart, Verwendung, Kurzbezeichnung | Reihe | Nennströme primär A | Nennströme sekundär A | Grenzströme $I_{th}$ | Grenzströme $I_{dyn}$ | Klassenleistungen Klasse | Klassenleistungen Nennleistung VA | Klassenleistungen N-Überstromziffer n | Anmerkungen | Ausführungsbeispiel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Primärwicklung, Sekundärwicklung, Eisenkern, Isolierung | | | | | | | | | | | |
|   | **Trockenwandler** *Einleiterwandler* Kleinwandler ohne Primärleiter für Durchsteck-Schiene AET | 0,5 bis 6 N | 30 bis 3000 | 5 od. 1 | mind. $60 \times I_n$ | prakt. unbegrenzt | 0,2<br>0,5<br>1<br>3 | 1 bis 30<br>1 bis 60<br>1 bis 60<br>1 bis 120 | < 5 | Geschlossener Bandringkern; in Preßstoffgehäuse, über 1000 A auch in Leichtmetallgehäuse; für Einbau in Schaltanlagen und Geräte, tragbar in Verbindung mit tragbaren Meßgeräten; mit oder ohne eingebautem Primärleiter; Mittelfrequenzwandler |  M 1:10 |
| | Kabelumbauwandler AEK | | 30 bis 1000 | 5 od. 1 | $100 \times I_n$ | | 0,5 bis 3 | 1 bis 120 | | Zweiteiliger Ringkern zum Messen ohne Leitungsunterbrechung | M 1:20 |
| | Zangenwandler AZT | 0,5 | 15 bis 1500 | 0,003 bis 0,3 | — | | | | | | |
|   | Gießharz-Schienenwandler ohne Primärschiene zum Aufschieben AET | 0,5 | 4000 bis 10000 | 5 | mind. $60 \times I_n$ | prakt. unbegrenzt | 1 | 60 | > 20 | Schenkelkern mit vierschenkliger Bewicklung, große Überstromziffer |   M 1:10 |
|  | Gießharz-Stabwandler mit Primärstab AEK | 10 N bis 30 N | 100, 150 200 bis 2000 | 1 od. 5 | mind. $100 \times I_n$ | prakt. unbegrenzt | 0,2<br>0,5<br>1<br>3 | 10 bis 30<br>10 bis 60<br>15 bis 60<br>15 bis 120 | < 5 bis > 10 | Einleiterwandler mit eingebautem Primärrundleiter und Flachanschlüssen für Einbau in Schienen; auch für Durchführung mit Flansch, bei Drehstromsatz Dreifachflansch mit 210 mm Phasenabstand. Ohne Primärleiter zum Aufschieben. |  AEK M 1:10 |
| | Porzellan-Stabwandler AEP | | 2500 bis 6000 | 5 od. 1 | etwa $100 \times I_n$ | prakt. unbegrenzt | 0,2<br>0,5<br>1<br>3 | 30<br>30 u. 60<br>15 bis 60<br>15 bis 120 | < 5 bis > 20 | Große dynamische Festigkeit. 1, 2 od. 3 Kerne; Porzellan-Stabwandler mit durchgehender Porzellanisolierung, Umbruchfestigkeit bis 750 kp | |

**Tafel 64** (Fortsetzung) — Bauarten von Stromwandlern

| Prinzip (Schnitt): Primärwicklung, Sekundärwicklung, Eisenkern, Isolierung | Kennzeichnung nach: Isolierung, Wicklungs- od. Bauart, Verwendung, Kurzbezeichnung | Reihe | Nennströme primär A | Nennströme sekundär A | Grenzströme $I_{th}$ | Grenzströme $I_{dyn}$ | Klassenleistungen: Klasse | Klassenleistungen: Nennleistung VA | Klassenleistungen: N-Überstromziffer n | Anmerkungen | Ausführungsbeispiel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
|   | *Wickelwandler* Kleinwandler mit Primärwicklung für Schienenanschluß AGT u. AGK | 0,5 | 5 bis 300 | 5 od. 1 | etwa $60 \times I_n$ | etwa $150 \times I_n$ | 0,2<br>0,5<br>1<br>3 | 5 bis 30<br>3 bis 30<br>5 bis 60<br>7,5 bis 60 | < 5 bis > 10 | Neben Verwendung als Schutz- und Zwischenwandler auch als Summenwandler und Großbereichwandler. Kleine Überstromziffer, geringer Eigenverbrauch | AGT M 1:10 |
|   | Gießharz-Stützerwandler ASK | 10 N<br>20 N<br>30 N | 5 bis 1500<br>2×5 bis 2×600<br>4×5 bis 4×300 | 5 od. 1 | 100 bis $1000 \times I_n$ max. 150 kA | $2{,}5 \times I_{th}$ max. 150 kA | 0,2<br>0,5<br>1<br>3 | 5 bis 30<br>5 bis 30<br>5 bis 60<br>5 bis 120 | < 5 bis > 10 | ASK: Hohe dynamische Festigkeit sowie mechanisch robust durch Gießharz-Isolierung. Sehr kleine Abmessungen, daher gut für gekapselte Schalteinheiten geeignet. 1:2 und 1:2:4 primär umschaltbar, Klarsicht-Abdeckung der Schaltlaschen, waagerechte Schienenanschlußstücke. | M 1:20  |
|   | Gießharz-Durchführungswandler ADK | 10 N<br>20 N<br>30 N | 5 bis 600<br>2×5 bis 2×300<br>4×5 bis 4×150 | 5 od. 1 | 100 bis $1000 \times I_n$ max. 150 kA | $2{,}5 \times I_{th}$ max. 150 kA | 0,2<br>0,5<br>1<br>3 | 5 bis 30<br>5 bis 30<br>5 bis 60<br>5 bis 120 | < 5 bis > 10 | ADK: Primäranschlüsse K und L nach entgegengesetzten Seiten. Sonstiger Aufbau wie ASK. 1, 2 od. 3 Kerne | M 1:20  |
|   | **Ölwandler** Freiluft-Topfwandler mit Öl-Papierisolierung, Luftabschluß ATOF (Zwillingswandler) | 60 N<br>110 N<br>150 N<br>220 N | 2×25 bis 2×500<br>4×25 bis 4×300 | 5 od. 1 | 100, 120, 150 bzw. $200 \times I_n$ | $2{,}5 \times I_{th}$ max. 120 kA | 0,2<br>0,5<br>1 | 15 u. 30<br>30 u. 60<br>30 u. 60 | < 5 bis > 10 | Primärwicklung umschaltbar 1:2 oder 1:2:4 aus zwei oder vier gleichen Spulen, völliger Luftabschluß durch Metall-Faltenbalg im ausschwenkbaren Wandlerkopf, geringe Ölmenge und kleine Abmessungen, große äußere Ähnlichkeit mit entspr. Spannungswandler VTOF (s. Tafel 69, S. 197), daher „Zwillingswandler". Strom- und Spannungswandler eng zusammen anschließbar. 2 Kerne | ATOF 60 N M 1:50 |
| | Stützerwandler Typ ASOF | 380 NE | 4×300 | 2×1 | 38/76/152 kA | 56/112/125 kA | 1. od. 0,2 G<br>2. 0,5 G<br>Kern 1 G | 15<br>30<br>60 | < 10<br>< 5<br>> 20 | Kaskadenwandler; zwei getrennte, für sich luftabgeschl. Systeme, mit Koppelwicklung, 2 Kerne | |

mißt die entsprechende Änderung des Stromes einer konstanten Hilfswechselspannung.

Neuerdings ist ein anderes Prinzip zum Messen großer Gleichströme zur Entwicklungsgrundlage genommen worden, das mit dem erst seit kurzem für Meßzwecke verwendeten Hallgenerator (s. S. 25) arbeitet und gegenüber den vorgenannten Verfahren die Vorteile linearer Anzeige und größer, von Fremdeinflüssen unabhängiger Genauigkeit hat.

## Spannungswandler

Spannungswandler sind Transformatoren kleiner Leistung, die nahezu im Leerlauf arbeiten. Sie halten die primärseitige Hochspannung von den angeschlossenen Meß- und Schutzkreisen fern und erweitern den Spannungsbereich von Meßgeräten, Zählern, Relais und Reglern, d.h. übersetzen in ihrem Arbeitsbereich die zu erfassende Spannung fast verhältnis- und phasengleich in bequem meßbare sekundäre Spannungen (genormte $U_{1n}$ und $U_{2n}$ s. Tafel 65).

Man unterscheidet primärseitig ein-, zwei- und auch dreipolig isolierte Bauarten (s. Tafel 69, S. 197). Bei der dreipolig isolierten Ausführung handelt es sich um zwei in V-Schaltung angeordnete zweipolige Systeme, die in einem Gehäuse mit drei Isolatoren untergebracht sind.

**Tafel 65** Genormte primäre und sekundäre Nennspannungen $U_{1n}$ und $U_{2n}$ von Spannungswandlern (VDE 0414/5.58). (Bevorzugte Werte hervorgehoben)

| Primäre Nennspannungen | Sekundäre Nennspannungen |
|---|---|
| Reihen 0,5 bis 45 N[3]):<br>**220; 380; 500 V**<br>**21; 3; 5; 6**[1]**; 10; 15**[1]**; 20; 25**[1]**; 30; 35; 45 kV**<br>oder die durch $\sqrt{3}$ geteilten Werte<br>Reihen 60 N[3]) bis 220 N[3]):<br>**50/$\sqrt{3}$; 60/$\sqrt{3}$; 110/2**[2]**); 110/$\sqrt{3}$; 150/$\sqrt{3}$; 220/$\sqrt{3}$ kV**<br>Reihe 380 N E[3]):<br>**400/$\sqrt{3}$ kV** | *Meßwicklungen*<br>Reihen 0,5 bis 45 N[3]);<br>**100**[1]**) oder 100/$\sqrt{3}$ V**<br>Reihen 60 N[3]) bis 220 N[3]):<br>**100/2**[2]**); 100/$\sqrt{3}$ oder 2 · 100/$\sqrt{3}$ V**<br>Reihe 380 NE[3]):<br>**2 · 100/$\sqrt{3}$; 2 · 200/$\sqrt{3}$ V**<br>*Wicklungen für Erdschlußerfassung:*<br>**100/3; 100/2 V**[2]) |

[1]) Auch für Einphasen-(Bahn-)Anlagen mit starr geerdetem Außenleiter.
[2]) Nur für Einphasen-(Bahn-)Anlagen mit nicht starr geerdetem Mittelpunkt.
[3]) Vgl. S. 179, „Reihenspannung $U_r$".

**Tafel 66** Genormte Nennleistungen[1]) der Meßwicklungen von induktiven Spannungswandlern (VDE 0414/5.58). (Bevorzugte Werte hervorgehoben)

| Klasse | Drehstromanlagen | | | | | Einphasen-(Bahn-)Anlagen | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Reihe | | | | | | |
| | 0,5 | 1 N[2]) bis 6 N[2]) | 10 N[2]) bis 45 N[2]) | 60 N[2]) | 110 N[2]) bis 220 N[2]), 380 NE[2]) | 0,5 bis 30 N[2]) | 110 N[2]) |
| | Nennleistung in VA | | | | | | |
| 0,2 | 10 | 10 | 15 **30** | **120** | **120** | — | — |
| 0,5 | 15 **30** | 30 | 30 **60 90** | 240 300 | 300 | — | — |
| 1 | 30 **60** | 60 | 120 180 | | | 60 | 150 |

[1]) Die Nennleistungen gelten nur für Nennfrequenz. Abweichungen von der Nennfrequenz bedingen quadratische (also nicht lineare) Abweichungen von der Nennleistung, denn statt der Nennspannung muß eine proportional mit der Frequenz abweichende Spannung angelegt werden.

[2]) Vgl. S. 179, „Reihenspannung $U_r$.

**Tafel 67** Zulässige Spannungsfehler $F_u$ und Fehlwinkel $\delta_u$ von Spannungswandlern (VDE 0414/5.58) [1])

| Klasse | Primäre Spannung | Spannungsfehler $\pm F_u$ in % | Fehlwinkel $\pm \delta_u$ in Minuten |
|---|---|---|---|
| 0,1 | 0,8 bis 1,2 · $U_{1n}$ | 0,1 | 5 |
| 0,2 | | 0,2 | 10 |
| 0,5 | | 0,5 | 20 |
| 1 | | 1,0 | 40 |
| 3 | 1,0 · $U_{1n}$ | 3,0 | — |

[1]) Die Fehlergrenzen gelten, Nennfrequenz vorausgesetzt, bei Wandlern der Klassen 0,1 bis 1 für Bürden zwischen 1/4 und 1/1 Nennbürde und bei Wandlern der Klasse 3 für Bürden zwischen 1/2 bis 1/1 Nennbürde (sekundärer Leistungsfaktor $\cos\beta = 0{,}8$). Bei Wandlern aller Klassen, ausgenommen jene der Klasse 3 mit einer größeren Nennleistung als 60 VA, werden die Fehlergrenzen von derjenigen Bürde an eingehalten, die bei Nennspannung eine Leistung von 15 VA ergibt.

Spannungswandler haben nur einen Eisenkern — meist Mantelkern — und werden primärseitig abgeglichen. Sie sind allgemein nur mit einer Sekundärwicklung ausgeführt. Im Bedarfsfall wird bei einpolig isolierten Spannungswandlern neben der Sekundärwicklung, also der Meßwicklung, eine Hilfswicklung zur Erdschlußerfassung vorgesehen, die keiner Klassenangabe bedarf. Für Drehstromnetze wurden früher an Stelle von drei einpolig isolierten Wandlern mit Hilfswicklung auch sog. Fünfschenkelwandler gebaut. Man ging von diesen Wandlern hauptsächlich deshalb ab, weil bei Beschädigung das ganze Aggregat ausgebaut werden mußte.

Während die Wicklungen ortsfester Wandler normalerweise keine Anzapfungen haben, führt man tragbare Wandler mit mehreren sekundärseitigen Anzapfungen und für Laborzwecke — zur Erzielung möglichst vieler Meßbereiche — sogar mit primär- und sekundärseitigen Anzapfungen aus. Zu beachten ist, daß sich die Leistung beim Umschalten von einer Sekundäranzapfung auf eine andere etwa quadratisch mit dem Umschaltverhältnis ändert.

Neben der Nennleistung wird bei Spannungswandlern auch die Grenzleistung in VA angegeben. Sie beträgt bei Siemens-Wandlern je nach Reihenspannung und Klasse etwa das 10- bis 50fache der Nennleistung. Bei Wandlern mit erhöhter Sicherheit ist sie entsprechend der geringeren Grenztemperatur niedriger.
Für die Wicklung zur Erdschlußerfassung sind folgende Leistungen ohne Klassenangabe genormt:

Drehstromanlagen:
Reihen 0,5 bis 45 N 60/3 VA
Reihen 60 N bis 220 N 120/3 VA
Einphasen-(Bahn-)Anlagen:
Reihe 110 N 120/2 VA

Diese Leistungen entsprechen der jeweiligen thermischen Grenzleistung einer Wicklung, bezogen auf den Drehstromsatz und den Fall des satten Erdschlusses eines Hauptleiters. Da die Wicklung zur Erdschlußerfassung im Normalbetrieb nicht belastet ist, wird ihre Leistung beim Festlegen der Leistung der Meßwicklung nicht berücksichtigt.

Spannungswandler aller Klassen sind bei Nennbürde $Y_n$ dauernd bis $1{,}2 \cdot U_n$ belastbar.

Entsprechend ihrer Genauigkeit sind die Spannungswandler in *Klassen* eingeteilt, die durch Klassenzeichen gekennzeichnet sind (s. Tafel 67).

Während bei Stromwandlern wegen der möglichen großen Stromschwankungen infolge Änderungen der Netzbelastung die Fehlerangaben für 0,1 (0,05) bis 1,2 (2,0) $\cdot I_{1n}$ gemacht werden, sind für Spannungswandler nur Fehlerangaben für 0,8 bis 1,2 $\cdot U_{1n}$ erforderlich.

Spannungswandler sind zum Nachweis der ausreichenden Bemessung ihrer Isolation gegen betriebsmäßige Spannungsbeanspruchungen den gleichen Prüfungen wie Stromwandler zu unterziehen (s. S. 184). Zusätzlich wird die Güte der Isolation von Gießharzspannungswandlern im Rahmen der Stückprüfung durch eine Glimmeinsatzprüfung überwacht.

Die *Wicklungsprüfung* wird an zwei- und dreipolig isolierten Spannungswandlern mit Wechselspannung (50 Hz) durchgeführt. Bei einpolig isolierten Wandlern, deren einer Pol geerdet ist, wird sie nach Freimachen von X mit 2 kV gegen Erde durchgeführt. — Zur *Windungsprüfung* wird Wechselspannung erhöhter Frequenz verwendet. — Mit den bei der Stoßspannungsprüfung dem unteren Stoßpegel zugeordneten Prüfspannungen wird die äußere Isolation des Wandlers geprüft, mit den dem oberen Stoßpegel zugeordneten die innere. Das Wandlerinnere muß also stoßspannungsfester sein als das Wandleräußere, d.h., ein Wandler soll eher außen überschlagen als innen durchschlagen.

Im Gegensatz zu Stromwandlern dürfen Spannungswandler sekundärseitig niemals kurzgeschlossen werden. Bezüglich Erdung und Kenn-

**Tafel 68** Bezeichnung der Anschlußklemmen von Spannungswandlern (VDE 0414/5.58)

| | zweipolig isoliert | | | einpolig isoliert | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | nicht umschaltbar | primär umschaltbar (Reihen- oder Parallelschaltung) | mit Anzapfungen | nicht umschaltbar | sekundär umschaltbar (Reihen- oder Parallelschaltung) | mit Anzapfungen | mit Erdschlußerfassung |
| Primär-Anschlüsse | U und V | $U_a$, $U_b$ und $V_a$, $V_b$ | $U_1$, $U_2$,... und V | U und X | U und X | $U_1$, $U_2$,... und X | U und X |
| Sekundär-Anschlüsse | $u$ und $v$ | $u$ und $v$ | $u_1$, $u_2$,... und $v$ | $u$ und $x$ | $u_a$, $u_b$ und $x_a$, $x_b$ | $u_1$, $u_2$,... und $x$ | $u$, $e$ und $x$, $n$ |

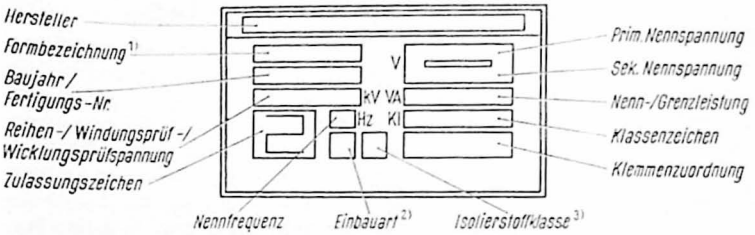



Bild 136 Leistungsschild für Spannungswandler mit den lt. VDE 0414/5.58 erforderlichen Angaben. 1) 2) 3) s. S. 185

zeichnung durch Blitzpfeil s. S. 184. (Sekundär wird normalerweise $x_1$, bei zweipoligen Wandlern $v$ und bei V-Schaltung die mit $u$ verbundene Klemme $v$ geerdet. Die Hilfswicklungen im Drehstromsatz sind im offenen Dreieck mit der freien $n$-Klemme an Erde zu schalten.)

*Kapazitive Spannungswandler* (s. Tafel 69). Wie Bild 137 zeigt, wird die Primärspannung $U_1$ am kapazitiven Spannungsteiler $C_1$, $C_2$ in die Teilspannungen $U_{C_1}$ und $U_{C_2}$ aufgeteilt. Die Teilspannung $U_{C_2}$ liegt über eine Drosselspule am Anpassungswandler. Um einen möglichst großen Sekudärstrom entnehmen zu können, wird die Drosselspule so abgestimmt, daß bei Nennfrequenz Resonanz zwischen der Induktivität des Meßkreises und der Summe der Kapazitäten besteht.

Kapazitive Spannungswandler können als praktisch offene Teilerwandler und deshalb als echte Spannungswandler angesehen werden. Sie erfüllen ebenso wie die induktiven Wandler die in den „Regeln für Wandler" festgelegten Genauigkeitsbedingungen.

Beim ausgeführten Spannungswandler für 400 kV (Tafel 69) sind die einzelnen Systeme aus Transportgründen mechanisch trennbar. Wirtschaftlich sind kapazitive Spannungswandler erst für hohe Spannungen. Sie können gleichzeitig als Koppelkondensatoren für Trägerfrequenz-Übertragung ausgenutzt werden.

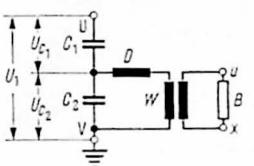



Bild 137
Kapazitiver Wandler, Grundschaltung.

$U_1$ Primärspannung, $U_{C_1}$, $U_{C_2}$ Teilspannungen, $C_1$, $C_2$ Kondensatoren, $D$ Drossel, $W$ Anpassungswandler, $B$ außenliegende Bürde

## Kombinierte Strom- und Spannungswandler

Die Ausführung von Strom- und Spannungswandlern in Zwillingsbauform mit sehr geringem Raumbedarf (vgl. Tafel 64 und 69) hat die bisherigen Bauformen kombinierter Strom- und Spannungswandler weitgehend abgelöst. Zwillingswandler lassen sich so eng benachbart aufstellen, daß sie kaum mehr Platz beanspruchen als ein kombinierter Wandler älterer Bauart, bei dem beide Systeme in einem Isolator mit meist verhältnismäßig großem Durchmesser eingebaut waren. — Aus der Zwillingsbauform ist inzwischen eine neue Ausführung kombinierter Wandler hervorgegangen, die Doppelisolator-Kombination mit gemeinsamem Topf (Bild 138). Dieser Wandler ist wirtschaftlicher als zwei Einzelwandler, da nur der Stromwandlerteil einen Kopf mit Umschaltvorrichtung und Volumen-Ausdehnungskörper braucht, während der Spannungswandlerteil mit einem flachen Deckel abgeschlossen ist. Sein kleiner Kopfdurchmesser erlaubt auch die bei modernen Schaltern erzielbaren Hauptleiterabstände einzuhalten. Der gemeinsame Topf hat einen Sekundärklemmenkasten mit den Sekundäranschlüssen für beide Wandlerteile. Elektrisch ist die Wandlerkombination den Einzelwandlern völlig gleichwertig.

Bild 138 Doppelisolator-Wandlerkombination mit gemeinsamem Topf, Bauform AVTOF 110.

**Tafel 69**

## Bauarten von Spannungswandlern

Prinzip (Schnitt)
- Primärwicklung
- Sekundärwicklung
- Eisenkern
- Isolierung

| Kennzeichnung nach: Isolierung Bauart Verwendung Kurzbezeichnung | Reihe | Nennspannung einpolig isoliert prim. kV | Nennspannung einpolig isoliert sek. V | Nennspannung zweipolig isoliert primär kV | Nennspannung zweipolig isoliert sek. V | Grenzleistung I-polig VA | Grenzleistung II-polig VA | Klasse | Nennleistung VA | Anmerkung | Ausführungsbeispiel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Trockenwandler** Niederspannungs-Kleinwandler VGT 0,5 und VGT—K3 | 0,5 | 0,1/√3 bis 0,5/√3 | 100/√3 | 0,1 bis 0,5 | 100 | 100 | 150 | 0,5 | 15; 30 | Spannungswandler haben meist Mantelkern. VGT 0,5: Leichtmetallsockel und Preßstoffgehäuse; Schutzwandler. VGT-K 3: Preßstoffgehäuse K 3; bei Sparschaltung in Kl. 1 nur max. 120 VA (je nach Übersetzung) | VGT / VGT-K3 |
| | | | | | | | | 1 | 30 bis 60 | | |
| | | | | | | | | 3 | 60; 120 | | |
| | | | | | | 15 | | 3 | 5 | | |
| Gießharz Innenraum VSK I u. II | 3 N[1] 6 N | 3/√3 bis 35/√3 | 100/√3 oder 110/√3 [2] und 100/√3 [2] ab 6 N auch 100/3 | 3 bis 35 | 100 u./od. 110 [3] | 300 | 400 | 0,2 0,5 1 | 30 [4] 90 [5] 180 [6] | Kompakter Gießharzblock enthält Primärwicklung, Anschlüsse und Sekundärwicklungen; eingeschachtelter Mantelkern mit Meßwicklung von Metallsockel geschützt. Elektr. und mechan. Festigkeit der Gießharzisolierung besser als die von Porzellan. [1]) nur zweipolig; [2]) nicht für 6 N; [3]) nicht für 3 N u. 6 N; [4]) 10 VA für 3 N u. 6 N; [5]) 30 VA für 3 N u. 6 N; [6]) 60 VA für 3 N u. 6 N | M 1:20 |
| | 10 N | | | | | 500 | 600 | | | | |
| | 20 N | | | | | 600 | | | | | |
| | 30 N | | | | | 800 | | | | | |
| **Ölwandler** Öl-Papier/ Porzellan Topfwandler, ölwarm Innenraum VTO I u. II Freiluft VTOF | 6 N | 1/√3 bis 50/√3 | 100/√3 u./od. 100/√3 | 1 bis 35 | 100 u./ od. 110 | 300 | 400 | 0,2 0,5 1 | I: 10 bis 30 | Topf ist dem Kern weitgehend angepaßt, daher nur geringe Ölmenge (ölarm). Hohle Isolatoren gleichzeitig Ölausdehungsgefäß. Auch für hängenden und liegenden Einbau | M 1:20 |
| | 10 N | | | | | 400 | 600 | | | | |
| | 20 N | | | | | 600 | 800 | | I: 30 bis 120 | | |
| | 30 N | | | | | 800 | 1000 | | I: 60 bis 240 | Freiluftausführung mit Freiluft-Isolatoren und Luftabschluß bei einpoliger Ausführung | |
| | | | | | | | | | II: 10 bis 30 | | |
| | | | | | | | | | II: 30 bis 90 | | |
| | | | | | | | | | II: 60 bis 180 | | |
| Sonderform VTO III dreipolig isoliert | 10 N | kV 2 bis 10 | | V 100 u./od. 110 | | 2 × 500 | | 0,2 0,5 1 | 2× 30 2× 90 2×180 | Doppel-Spannungswandler mit zwei zweipoligen Systemen in V-Schaltung; Topfgehäuse mit drei Isolatoren. Auch für hängenden und liegenden Einbau | M 1:20 |

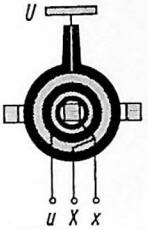
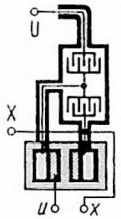
einpolig

zweipolig

dreipolig

Tafel 69 (Fortsetzung)

Bauarten von Spannungswandlern

| Prinzip (Schnitt): Primärwicklung, Sekundärwicklung, Eisenkern, Isolierung | Kennzeichnung nach: Isolierung, Bauart, Verwendung, Kurzbezeichnung | Reihe | Nennspannung einpolig isoliert prim. kV | Nennspannung einpolig isoliert sek. V | Nennspannung zweipolig isoliert primär kV | Nennspannung zweipolig isoliert sek. V | Grenzleistung I VA | Grenzleistung II VA | Klasse | Nennleistung VA | Anmerkung | Ausführungsbeispiel |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
|   | Öl-Papier Topfwandler Freiluft VTOF (Zwillingswandler) | 60 N<br>110 N<br>150 N<br>220 N | 45/√3 bis 220/√3 | 100/√3 oder 110/√3; 100/3 | | | 2000<br>3000<br>3000<br>5000 | | 0,2<br>0,5<br>1 | 120<br>300<br>600 | Äußerer Aufbau und Luftabschluß wie Stromwandler, s. Taf. 64, S. 187; Spannungsabbau an der aus einer Spule bestehenden Primärwicklung mit Kondensator-Durchführung zur Steuerung der Spannungsbeanspruchung bis zum Wandlerkopf | VTOF 110 N M 1:50 |
|   | Kapazitiver Wandler in Stützerbauart Freiluft VCSOF | 380 NE | 400/√3 | | 2×200/√3 | | 2000 | | 0,5<br>(1) | 80<br>(120) | s. S. 95<br>Kapazität 4400 pF | M 1:100 |

# X. Widerstands- und Isolationsmessung

## Gegenüberstellung der Meßverfahren

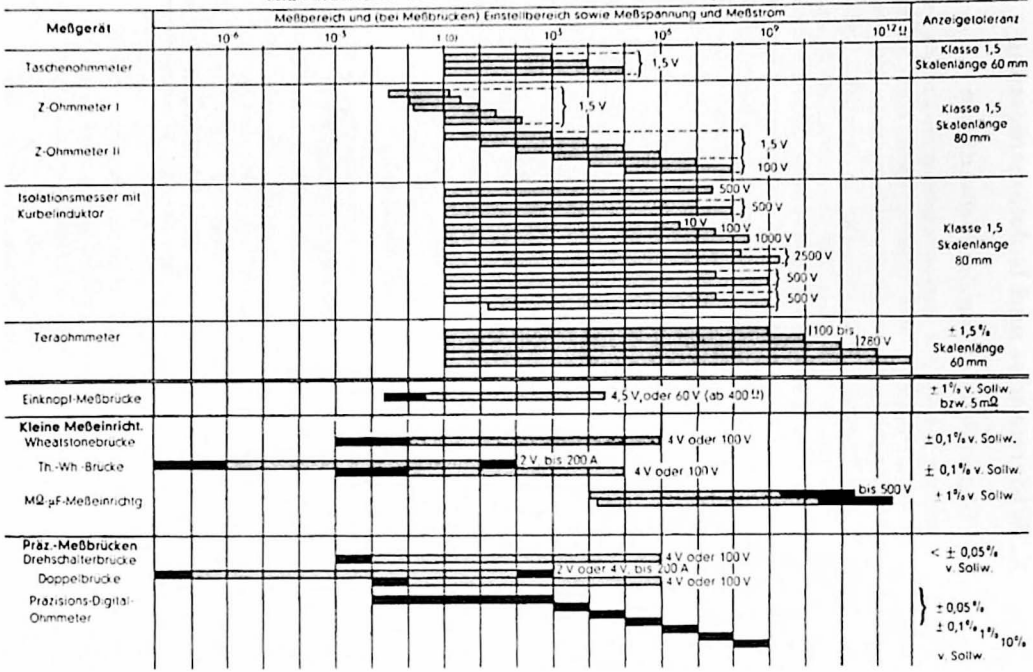
Widerstände können sowohl mit direktanzeigenden Meßgeräten als auch mit Meßgeräten für indirekte Meßverfahren (Null- oder Ausschlagsvergleich-Methoden) gemessen werden, sowie neuerdings auch mit dem Präzisions-Digital-Ohmmeter (s. S. 108), das als anzeigende, selbstabgleichende Meßbrücke eine Mittelstellung einnimmt. Für Widerstände kleiner $10^{-2}\,\Omega$ kommen jedoch nur indirekte Meßverfahren in Betracht. Bei der Auswahl des Gerätes wird neben der Schnelligkeit, mit der die Messungen auszuführen sind (die herkömmlichen Meßbrücken eignen sich wegen der mittelbaren Anzeige oft nicht für rasche Messungen), hauptsächlich die geforderte Meßgenauigkeit ausschlaggebend sein.

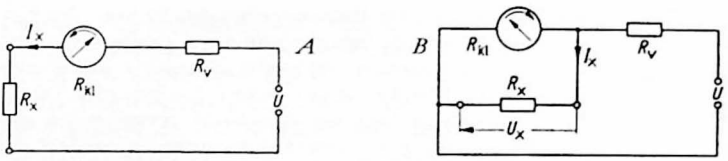
Tafel 70 gibt eine Übersicht über Meßbereiche und Anzeigetoleranzen verschiedener Meßgeräte. Es ist zu beachten, daß die Genauigkeitsangaben bei den anzeigenden Meßgeräten auf die Skalenlänge, bei den Meßbrücken dagegen auf den Sollwert bezogen sind. Bei Meßbrücken ist daher innerhalb der angegebenen Meßbereiche die erzielbare Genauigkeit gleichbleibend und unvergleichlich höher als bei den direktanzeigenden Meßgeräten, zumal deren Instrument-Skalen meist einen hyperbolischen Verlauf haben, so daß der Meßwert zum Ende der Skale hin nur größenordnungsmäßig bestimmt werden kann.

## Direktanzeigende Meßgeräte

Widerstandsmessungen mit unmittelbarer Meßwertanzeige werden meist als *Strommessungen* ausgeführt, d. h., man legt an den zu messenden Widerstand eine bestimmte Meßspannung und mißt den Strom (Bild 139 *A*). Zur Anzeige dienen im allgemeinen hochempfindliche Drehspulinstrumente, deren Skalen in $\Omega$ geeicht sind und von rechts nach links verlaufen (Bild 140 *A*), weil der Strom bei $R_x = 0$ seinen Maximalwert hat und bei $R_x = \infty$ Null ist. Da sich der Strom und damit der Ausschlag des Instruments umgekehrt proportional zu dem zu messenden Widerstand verhält, verläuft die Skale hyperbolisch. Maßgebend für den Skalenverlauf ist der Widerstand $R_{kl} + R_v$, der den Mittelwert der Skale bestimmt, denn bei $R_x = R_{kl} + R_v$ ist der Strom im Instrument halb so groß wie bei $R_x = 0$. Um beim Messen die garantierte Meßgenauigkeit möglichst gut auszunutzen, wählt man zweckmäßigerweise einen Meßbereich, bei dem der zu messende Wert in der Größenordnung dieses Mittelwertes liegt.

**Tafel 70** Meßbereich und (bei Meßbrücken) Einstellbereiche (schwarz) sowie Meßspannungen und Meßströme von Widerstands- und Isolationsmeßgeräten






$U$ Meßspannung
$R_v$ Vorwiderstand
$R_{kl}$ Instrumentwiderstand

$R_x$ zu messender Widerstand
$I_x$ Strom durch $R_x$
$U_x$ Spannungsabfall an $R_x$

Bild 139 Widerstandsmesser, Grundschaltungen

*A* Reihenschaltung von Instrument und $R_x$ (Widerstandsmessung auf Strommessung zurückgeführt, Nullpunkt rechts)
*B* Parallelschaltung von Instrument und $R_x$ (Widerstandsmessung auf Spannungsmessung zurückgeführt, Nullpunkt links)

In manchen Fällen, besonders beim Messen kleiner Widerstände, arbeitet man mit Rücksicht auf die Belastbarkeit des Prüflings und auch zur Schonung der Meßbatterie mit einer niedrigen Meßspannung und führt die Widerstandsmessung auf eine *Spannungsmessung* zurück (Bild 139*B*). Durch die Parallelschaltung von $R_x$ zu $R_{kl}$ wird bei $R_x = 0$ auch der Strom durch $R_{kl}$ Null; bei $R_x = \infty$ wird der Strom durch $R_{kl}$ maximal. Der Nullpunkt der Widerstandsskale liegt also wie bei einem normalen Spannungsmesser links (Bild 140*B*). Die Schaltung erleichtert eine linearisierte Ausführung der Skale und ermöglicht je nach Wahl von $R_v$ ihre Begrenzung nach oben.

In *Geräten mit mehreren Meßbereichen* werden zuweilen beide Schaltungen vereinigt. Sie können folglich von links nach rechts und von rechts nach links verlaufende Skalen haben.

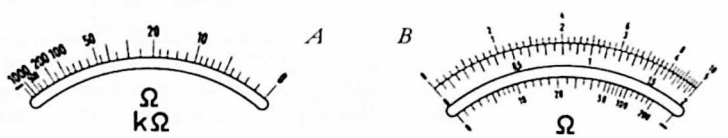



Bild 140 Skalen der Z-Ohmmeter (Maßstab 1:2,5)

*A* Skale des hochohmigen Z-Ohmmeters II (Schaltung nach Bild 139*A*) für sechs dekadisch gestufte Meßbereiche von $\times 1$ bis $\times 10^5$
*B* Mehrfachskale des niederohmigen Z-Ohmmeters I (Schaltung nach Bild 139*B*) für fünf Meßbereiche: 2–5–10–50 (obere linearisierte und begrenzte Skalen) und 200 Ω (untere Skale)

Wird als Meßspannungsquelle eine Batterie verwendet, so kann der Einfluß der mit der Zeit abnehmenden Batteriespannung in gewissen Grenzen beseitigt werden: Vor dem Messen ist bei kurzgeschlossenen Instrumentklemmen (Strommethode) bzw. bei offenen oder mit einem eingebauten Ersatzwiderstand überbrückten (Spannungsmethode) entweder ein magnetischer Nebenschluß oder ein Widerstand so zu verstellen, daß sich der Zeiger des Instruments auf die Nullmarke bzw. auf den Endteilstrich der Skale einstellt.

**Taschenohmmeter** (Bild 141). Das Taschenohmmeter stellt die einfachste Ausführung eines Widerstandsmessers und Leitungsprüfers dar. Es ist entsprechend Bild 139 *A* geschaltet und wird sowohl mit den Einzelbereichen 10 oder 100 kΩ als auch mit drei Bereichen 1–10–100 kΩ ausgeführt. Die Meßspannung liefert eine halbe Stabbatterie (1,5 V). Am magnetischen Nebenschluß läßt sich die Meßempfindlichkeit so weit nachstellen, daß noch bei einer Spannung von etwa 1,1 V gemessen werden kann. In der „Bergbau-Ausführung" (Minenprüfer) ist der Meßstrom zur gefahrlosen Prüfung von Brückenglühzündern auf 7 mA bei Klemmenkurzschluß begrenzt.

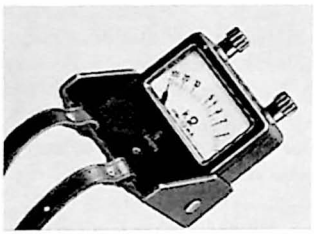


Bild 141
Taschenohmmeter im Tragrahmen

**Z-Ohmmeter I und II** (s. Tafel 70). Diese Instrumente (I: Spannungsmethode, II: Strommethode) der MULTIZET-Serie (s. Tafel 30, S. 56) ermöglichen wegen ihrer mit Spiegeln unterlegten Skalen und der großen Skalenlängen von 80 mm (Bild 140 *A* und *B*) ein genaues Ablesen der Meßwerte, und zwar besonders in den Meßbereichen mit den linearisierten Skalen. Als Meßspannungsquelle ist eine halbe Stabbatterie einzusetzen; für die Meßbereiche 10 und 100 MΩ beim Z-Ohmmeter II muß eine 100-V-Anodenbatterie außen angeschlossen werden. Läßt die Batteriespannung nach, dann kann man die Meßempfindlichkeit jeweils an Widerständen nachstellen. Während man beim Z-Ohmmeter II den dabei not-

wendigen Klemmenkurzschluß durch eine Prüftaste herbeiführt, schaltet man beim Z-Ohmmeter I den dabei erforderlichen Ersatzwiderstand für $R_x$ mit dem Meßbereichwähler ein. Das Meßgerät kann also beim Prüfen bereits angeschlossen sein, so daß nach dem Prüfen das Meßergebnis sofort ablesbar ist. Zur Meßbereichwahl dienen Drehschalter.

**Isolationsmesser.** Messungen des Isolationswiderstandes elektrischer Anlagen, Maschinen und Kabel erfordern hohe Meßspannungen, weil Widerstandswerte von 1 MΩ und mehr mit ungefähr der Betriebsspannung gemessen werden müssen. Damit die Meßspannung bei kleinen Widerständen nicht unzulässig absinkt, ist eine große Leistung der Spannungsquelle erforderlich; bei den 500-V-Geräten (Tafel 70) ist sie z. B. so groß, daß ein Kurzschlußstrom von etwa 5 mA fließt und beim Prüfen einer 220-V-Anlage noch am minimal zulässigen Isolationswiderstand von 220 kΩ eine Meßspannung von 340 V auftritt. Zweckmäßig ist die Verwendung einer Gleichspannung, weil man dann ein hochempfindliches Drehspulmeßwerk (mit Spannbandlagerung) benutzen kann und die Kapazität des Prüflings die Messung nicht stört. Isolationsmesser haben deshalb einen kräftigen Drehmagnet-Kurbelinduktor, dessen Spannung mit mechanischer Drehzahlregelung konstant gehalten und über Gleichrichter in Verdopplerschaltung auf ihren Nennwert gebracht wird.
Alle für Abnahmeprüfungen bestimmten Isolationsmesser (in Tafel 70 die beiden oberen) haben neben den Isolationsskalen eine 500-V-Skale für Spannungsmessungen an Gleich- und Wechselstromnetzen (s. Bild 142).

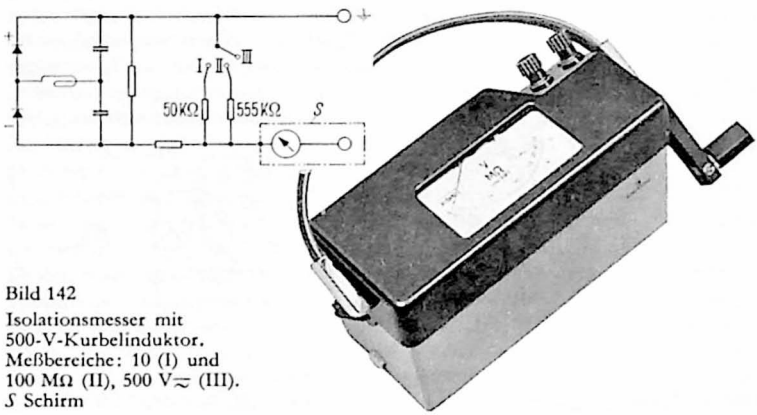



Bild 142
Isolationsmesser mit 500-V-Kurbelinduktor. Meßbereiche: 10 (I) und 100 MΩ (II), 500 V≂ (III). *S* Schirm

Damit die Meßergebnisse nicht durch im Meßgerät etwa auftretende Isolationsströme gefälscht werden können, ist in die Geräte eine Kriechstromableitung eingebaut.
Für die Isolationskontrolle beim Austrocknen feuchter Maschinen, Transformatoren und Geräte gibt es einen Isolationsmesser mit verschiedenen Meßspannungen (10–100–1000 V bei 0 bis 5–50–500 MΩ), weil beim Beginn des Austrocknens (der Isolationswiderstand kann 2 Ω und weniger betragen) nur mit niedriger Spannung geprüft werden darf. Ein Gerät zum Beobachten des Isolationszustands von Hochspannungsanlagen hat eine maximale Meßspannung von 2500 V (Isolations-Meßbereiche 250 und 2500 MΩ).
Für die Isolationsprüfung von Fernmelde-Fernkabeln werden Geräte mit besonders hochwertiger Glimmstrecken-Stabilisierung gebaut, um bei Kabeln mit größerer Kapazität kurze Aufladezeiten zu erzielen und sicher messen zu können.

**Teraohmmeter.** Für die direkte Anzeige extrem hoher Widerstandswerte bei niedriger Belastung des Prüflings (z. B. Kondensatoren, Röhren) wurde das Teraohmmeter entwickelt, bei dem die Widerstandsmessung auf eine praktisch leistungslose Messung des Spannungsabfalls am Prüfling zurückgeführt ist. Zur Anzeige dient ein elektrostatischer Spannungsmesser (Prinzip s. S. 134). Der große, dekadisch abgestufte Meßbereichumfang von 0 bis $10^9 \cdots 10^{13}$ Ω wird mit fünf umschaltbaren Vorwiderständen erzielt (Bild 143). Eine eingebaute 4,5-V-Taschenlampenbatterie, deren Strom (30 bis 50 mA) zerhackt, auf die erforderliche Spannung transformiert, wieder gleichgerichtet und von Glimmlampen geglättet wird, liefert die Meßspannung. Je nach Meßwert beträgt der Spannungsabfall am Prüfling 100 bis 280 V. Er kann an der V-Skale abgelesen werden, doch interessiert in erster Linie der entsprechende Widerstandswert, der

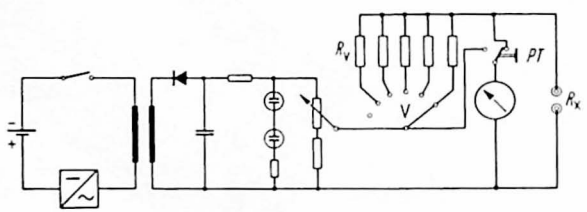



Bild 143 Teraohmmeter, Grundschaltung
$R_V$ Vorwiderstände, $R_X$ Anschluß für zu messenden Widerstand, PT Prüftaste

an der MΩ-Skale abzulesen ist. Zur Korrektur der Meßempfindlichkeit bei absinkender Batteriespannung dient ein Spannungsteiler, der beim Drücken der Prüftaste so zu verstellen ist, daß der Zeiger auf den Skalenwert ∞ einspielt. — Mit dem Teraohmmeter können bei der Stellung des Drehschalters auf „Volt" auch Netzspannungen bis 300 V≂ gemessen werden.

**Feuchtemesser.** Bei manchen Werkstoffen ist der elektrische Widerstand ein Maß für den Feuchtegehalt. Nach Ermittlung des jeweiligen Zusammenhanges kann das Teraohmmeter daher auch als elektrischer Feuchtemesser benutzt werden.
Für spezielle Fälle gibt es Feuchtemesser dieses Meßprinzips, z.B. Holz-, Tabak- und Hopfenfeuchtemesser, bei denen die Meßbereiche den jeweiligen Erfordernissen angepaßt sind und an deren Skalen der Feuchtegehalt unmittelbar in % abgelesen werden kann. Für die verschiedenen Verwendungszwecke werden hochisolierte Elektroden (beispielsweise Zwingen-, Einschlag-, Einspreiz- und Stempelelektroden für Holzfeuchtemesser — Ballen-, Stempel- und Zangenelektroden für Tabakfeuchtemesser) und Spezialzuleitungen ausgeführt.

## Meßbrücken und Ausschlagsvergleich-Meßeinrichtungen

*Meßbrücken* sind zur Messung hoher und mittlerer Widerstände in Wheatstoneschaltung und zur Messung sehr niedriger in Thomsonschaltung ausgeführt. Isolations-Widerstände können außer mit direktanzeigenden Meßgeräten nur durch *Ausschlagsvergleich* (MΩ-µF-Meßeinrichtung) ermittelt werden.
Dem *mechanischen Aufbau* nach unterscheidet man Meßbrücken mit Schleifdraht, mit Drehschaltern und mit Stöpselkontakten. Der Schleifdraht ist die einfachste und preiswerteste Ausführung eines Meßwiderstandes; er gestattet ein rasches Messen, kann aber wegen der geringeren Abgleichmöglichkeit nur für Betriebsmeßbrücken verwendet werden. Rasche Messungen ermöglichen auch die Drehschaltermeßbrücken. Sie werden als Betriebs- und Präzisions-Meßbrücken ausgeführt. Ihre Präzisions-Drehschalter gewährleisten einen minimalen, auf fast unbegrenzte Zeit konstanten Übergangswiderstand und eine sehr niedrige Eigenkapazität (das ist bei Messungen hoher Widerstände im Hinblick auf den Verlustwinkel wichtig). Die zwar sehr genauen aber umständlich einzustellenden Stöpselmeßbrücken sind heute weitgehend von den Drehschaltermeßbrükken verdrängt.

**Einknopf-Meßbrücke.** Als kleinste Meßbrücke steht die Einknopf-Meßbrücke (Bild 144, *a*), eine Wheatstonebrücke mit Schleifdraht, zur Verfügung. Zum genauen Abgleichen des Brückenverhältnisses $a/b$ ist der Schleifdraht $S$ auf beiden Seiten mit Zusatzwiderständen (Bild 145) „verlängert", so daß nur der mittlere Teil der Gesamtlänge zum Einstellen benutzt wird. Da der Schleifdrahtabgriff mit dem Steller des in sechs Stufen einstellbaren Vergleichswiderstandes $R_{vgl}$ über eine Raste gekuppelt ist, wird beim Durchdrehen nach links oder rechts stets die nächst niedrigere oder höhere Stufe des Vergleichswiderstandes eingeschaltet und zugleich ein Schutzwiderstand $R_{Sch}$ zum Begrenzen des Brückenstromes verstellt. Dadurch kann die Brücke vom niedrigsten bis zum höchsten Wert durch Betätigen nur eines Drehknopfes bei gleichzeitigem Drücken der im Drehknopf eingeordneten Batterie- und Galvanometertaste abgeglichen und das eingestellte Meßergebnis unmittelbar an der Drehknopfskale abgelesen werden. Die Brücke wird mit einer

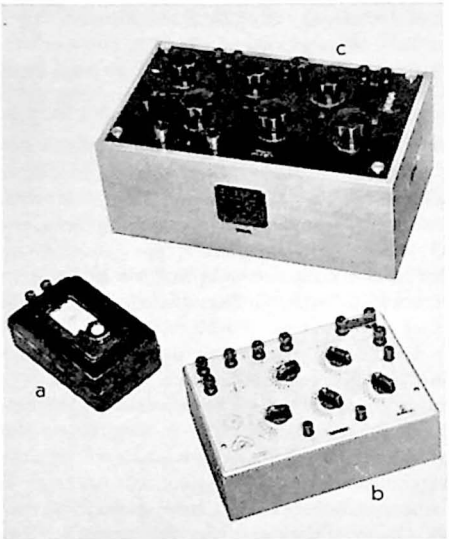
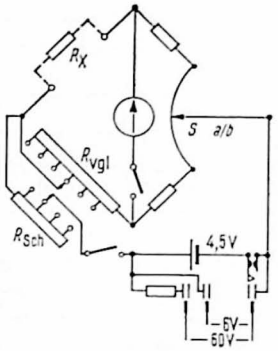



Bild 144 Meßbrücken. *a* Einknopf-Meßbrücke, *b* Thomson-Wheatstone-Meßbrücke, *c* Präzisions-Drehschaltermeßbrücke




$S$ Schleifdraht ($a/b$)
$R_{vgl}$ Vergleichswiderstand
$R_{Sch}$ Schutzwiderstand
$R_x$ zu messender Widerstand

Bild 145 Einknopf-Meßbrücke

eingebauten 4,5-V-Taschenlampenbatterie oder mit einer 6-V-bzw. (zum Erhöhen der Empfindlichkeit in den beiden höchsten Meßbereichstufen) 60-V-Außenbatterie betrieben. Der Meßbereich ist in sechs dekadische Stufen unterteilt: 40 bis 500 mΩ, ..., 4 bis 50 kΩ

## Kleine Meßeinrichtungen

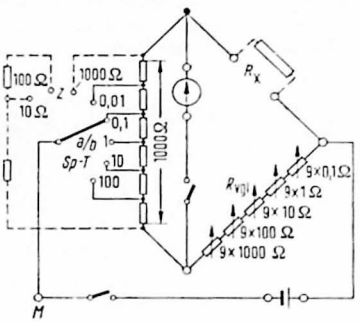
Für die Verwendung in Laboratorien, Prüffeldern und Werkstätten sowie zum Ausstatten von Meßtrupps mit vollständigen Meßeinrichtungen wird eine Serie kleiner Meßeinrichtungen (vgl. auch Tafel 70, S. 202) in einheitlicher Ausstattung gebaut, von denen Bild 144, *b*, als Ausführungsbeispiel die Thomson-Wheatstone-Meßbrücke zeigt. Bei diesen Geräten sind wie bei den Präzisions-Meßbrücken die Batterien und Galvanometer grundsätzlich nicht eingebaut, damit man in ihrer Auswahl freie Hand hat und beim Messen nötigenfalls das Galvanometer getrennt vom Gerät erschütterungsfrei aufstellen kann.

Als Meßspannungsquelle kommen für die Wheatstonemeßbrücke wie auch für alle von ihr abgeleiteten Brücken eine 4-V-Batterie geringer Leistung oder, falls es zum Steigern der Brückenempfindlichkeit erforderlich sein sollte, eine 100-V-Anodenbatterie in Betracht. Zum Schutz der Vergleichswiderstände ist stets ein Widerstand in eine der Zuleitungen zur Brücke zu legen, und zwar von etwa 5 Ω bei 4 V und von etwa 2000 Ω bei 100 V Meßspannung. Im ersten Falle arbeitet die Brücke mit „eingeprägter Spannung" (die Brückeneingangsspannung bleibt nahezu gleich und der Meßstrom paßt sich $R_x$ an), im zweiten mit „eingeprägtem Strom" (der Meßstrom wird vorwiegend vom 2000-Ω-Schutzwiderstand bestimmt

und die Brückeneingangsspannung paßt sich $R_x$ an). Die Wheatstonemeßbrücke kann auch mit Wechselstrom bis etwa 800 Hz, beispielsweise bei Messungen an Flüssigkeiten, benutzt werden, wobei als Nullindikator ein Kopfhörer verwendet wird.

**Wheatstonemeßbrücke und Kabelmeßbrücke** (Bild 146). Das Widerstandsverhältnis $a/b$ wird an einem Spannungsteiler *Sp-T* abgegriffen, der in fünf Stufen einstellbar ist, und zwar auf $a/b = 100–10–1–0{,}1$ und 0,01. Die Brücke hat einen in fünf Dekaden unterteilten Vergleichswiderstand $R_{vgl}$ von $9 \times 0{,}1\ \Omega$ bis $9 \times 1000\ \Omega$, also mit zusammen 9999,9 Ω, und eignet sich entsprechend der Gleichung $R_x = R_{vgl} \cdot a/b$ folglich für Messungen in einem Bereich von 0,001 bis $10^6\ \Omega$.

Zur vollen Ausnutzung der Empfindlichkeit können die Brückendiagonalen vertauscht werden. – Da $R_{vgl}$ an zwei Klemmen herausgeführt ist, läßt er sich getrennt als Dekadenwiderstand verwenden.




*Sp-T* Spannungsteiler ($a/b$)
$R_{vgl}$ Vergleichswiderstand
$R_x$ zu messender Widerstand
*M* Klemme für Fehlerortungen nach Murray

Bild 146 Wheatstonemeßbrücke und mit Zusatzwiderständen *Z* (gestrichelt) Kabelmeßbrücke

*Fehlerortungen an Kabeln.* Die erforderlichen Messungen können zu einem Teil bereits mit einer normalen Wheatstonemeßbrücke ausgeführt werden, wie z.B. die Fehlerortung nach Varley und der Adernvergleich.

Bei der *Varley-Methode* (Bild 147) wird der Widerstand der Kabelstrecke $L_x$ bis zum Fehlerort durch den Vergleichswiderstand $R_{vgl}$ auf den Widerstand des restlichen Teils der Schleife ($L - L_x + L_H$) ergänzt; der Fehlerort bildet also einen Brückeneckpunkt. Zuvor ist in normaler Brückenschaltung der Schleifenwiderstand $R_L + R_{L_H}$ auszumessen.

Unter der Voraussetzung, daß der Widerstand des Kabels *L* gleich dem der Hilfsleitung $L_H$ (meist eine zweite Ader des Kabels) ist, lautet die Auswertungsgleichung:

$$L_x = 2L\,\frac{2R_L - R_{vgl}\cdot a/b}{2R_L\,(1 + a/b)}\,.$$

Wird $a/b = 1$ eingestellt, so ist

$$L_x = L\,\frac{2R_L - R_{vgl}}{2R_L}\,.$$

Für den *Adernvergleich* wird die gleiche Schaltung, nur mit einem künstlichen Fehlerort am fernen Kabelende, benutzt. Es ist

$$\frac{a}{b} = \frac{R_{L_H}}{R_{vgl} + R_L}\,.$$

Bei $a/b = 1$ ist $R_{L_H} = R_{vgl} + R_L$ und folglich $R_{L_H} - R_L = R_{vgl}$.

$a/b$ Spannungsteilerverhältnis
$R_{vgl}$ Vergleichswiderstand
$L$ Kabellänge
$L_x$ Kabelstrecke bis zum Fehlerort
$L_H$ Länge der Hilfsleitung

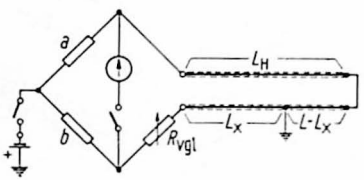



Bild 147
Fehlerortung nach Varley und Adernvergleich, Grundschaltung

Um *Fehlerortungen nach Murray* (Bild 148) ausführen zu können, wird die Wheatstoneschaltung um die Zusatzwiderstände $Z$ und eine Klemme $M$ zur Kabelmeßbrücke ergänzt. $Z$ ist auf einen der drei dekadischen Werte einzustellen und die Brücke an $R_{vgl}$ abzugleichen. Es ist

$$L_x = \frac{R_{vgl}}{Z + R_{vgl}}\,(L + L_H) \qquad \text{bzw.} \qquad L_x = 2L\,\frac{R_{vgl}}{Z + R_{vgl}}$$

($L + L_H = 2L$ bei Verwendung einer Kabelader gleichen Querschnittes als Rückleitung).

$Z$ Zusatzwiderstände
$R_{vgl}$ Vergleichswiderstand
$L$ Kabellänge
$L_x$ Kabelstrecke bis zum Fehlerort
$L_H$ Länge der Hilfsleitung

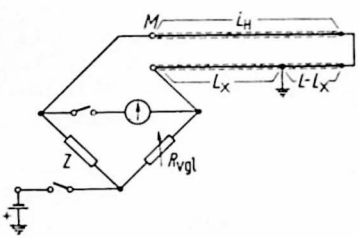
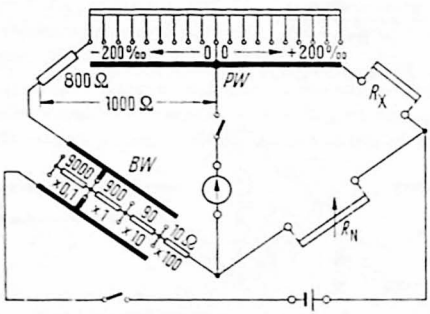



Bild 148
Fehlerortung nach Murray, Grundschaltung

**Promille-Meßbrücke** (Bild 149). Sie beruht auf dem Grundprinzip der Wheatstoneschaltung und wird als Sortiergerät in der Serienfabrikation verwendet, denn man kann mit ihr rasch feststellen, um wieviel ‰ nach plus oder minus ein Widerstand von seinem Sollwert, gegeben durch ein Vergleichsnormal $R_N$, abweicht. Die Brücke hat zwei Verhältniswiderstände: Am Bereichwähler *BW* sind die Stufen $\times 0{,}1$–1–10–100 einstellbar und am Promille-(Toleranz-)einsteller *PW* die Verstimmungen $\pm$ 1–2–3–5–10–20–50–100–200 ‰.




*BW* Bereichwähler
*PW* Promilleeinsteller
$R_N$ Vergleichsnormal
$R_x$ zu messender Widerstand

Bild 149
Promille-Meßbrücke

**Thomson-Wheatstone-Meßbrücke** (Bild 144, S. 208, und Bild 150). Bei der Thomsonschaltung werden als Vergleichswiderstände außen anzuschließende Normalwiderstände $R_N$ verwendet, die man sowohl an die $R_N$- als auch an die $R_x$-Klemmen anschließen kann. Unter der Voraussetzung, daß $R_1 = R_3$ und $R_2 = R_4$ und damit $R_1/R_2 = R_3/R_4$ ist, gelten die Gleichungen

$$R_x = R_N \cdot R_1/R_2 \quad (R_N \text{ an } R_N\text{-Klemmen})$$

und

$$R_x = R_N \cdot R_2/R_1 \quad (R_N \text{ an } R_x\text{-Klemmen}).$$

Die Verhältniswiderstände werden mit Doppeldrehschaltern eingestellt: $R_1 = R_3$ in vier Dekaden von $9 \times 0{,}1$ bis $9 \times 100\ \Omega$ und $R_2 = R_4$ in den vier Stufen 1–10–100–1000 Ω. Durch den Anschluß von $R_N$ an die $R_x$-Klemmen läßt sich der Meßbereich der Brücke folglich um eine Dekade erweitern.

Da Normalwiderstände von $R_N = 10^{-1}$ bis $10^{-4}\ \Omega$ verwendbar sind, beträgt der Gesamt-Einstellbereich $10^{-8}$ bis $10^{2}\ \Omega$ (Meßbereich $10^{-6}$ bis $10\ \Omega$). Mit dem zusätzlichen Einbau von zwei Klemmen ($R_{xWh}$ und $B_{Wh}$) und

einer Lasche wurde diese Schaltung zu einer Doppelmeßbrücke mit Thomson- und Wheatstoneschaltung ausgebaut. Beim Einlegen der Lasche wird die Thomsonschaltung in eine Wheatstoneschaltung mit $R_1$ als Vergleichswiderstand und $R_2/R_4$ als Verhältniswiderstand $a/b$ umgewandelt. Die obere Meßbereichgrenze in der Wheatstoneschaltung beträgt $10^5\ \Omega$ (vgl. Tafel 70, S. 202).

Die Widerstandsreihe $R_3$ kann bei Verwendung der linken und der rechten der drei $R_x$-Klemmen auch als Dekadenwiderstand dienen.

$R_1 = R_2$, $R_3 = R_4$ Verhältniswiderstände
$R_N$ Normalwiderstand
$R_{xTh}$ und $R_{xWh}$ zu messender Widerstand in Thomson- bzw. Wheatstoneschaltung
$B_{Wh}$ Batterie für Wheatstoneschaltung

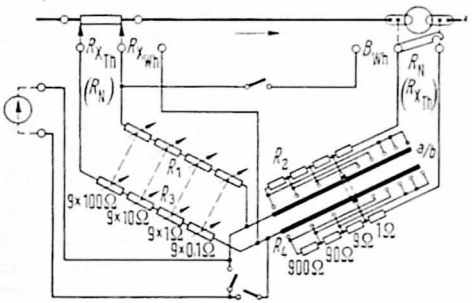



Bild 150
Thomson-Wheatstone-Meßbrücke

**Große tragbare Kabelmeßbrücke.** Mit diesem Gerät können besonders vielseitige Messungen bei der Fehlerortung an Stark- und Schwachstromkabeln durchgeführt werden. Es vereinigt in sich drei Meßbrücken: eine Doppelschleifdraht-Meßbrücke (Thomsonbrücke), von der ein Zweig für die Wheatstonebrücke ausgenutzt wird, eine Fehlerortungs- und eine Kapazitätsmeßbrücke. Das besondere Merkmal ist, daß die drei Hauptschalter (Bild 151)

zur Wahl der Meßart und des Meßbereiches,
zum Einstellen der Schleifdrahtverlängerung durch Zusatzwiderstände derart, daß die Fehlerquelle stets auf dem Schleifdraht abgebildet wird sowie
zum stufenlosen Einstellen des Doppelschleifdrahtes

so nebeneinander angeordnet und beschriftet sind, daß die Meßergebnisse unter Berücksichtigung einfacher Faktoren unmittelbar in den Einheiten mΩ, Ω, μF und $L\ ^0/_{00}$ abgelesen werden können. Für die Messungen stehen

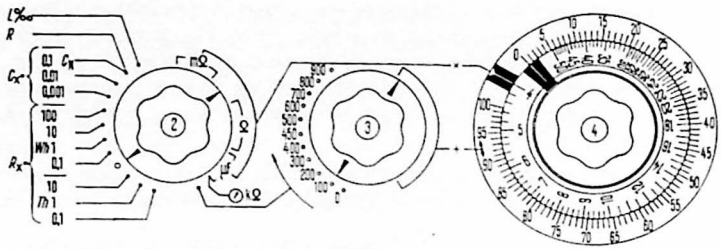


Bild 151 Große tragbare Kabelmeßbrücke, Anordnung der drei Hauptschalter

4-V-Gleich- oder -Wechselspannung (1000-Hz-Summer) und als Nullindikatoren ein kleines Zeigergalvanometer und ein Kopfhörer zur Verfügung. Das Galvanometer hat auch eine Ausschlagsskala für Isolationsmessungen bis 1 MΩ. Das Gerät ermöglicht folgende Messungen:

Thomson-Widerstandsmessung von 0,4 bis 500 mΩ,
Wheatstone-Widerstandsmessung von 0,4 bis 5000 Ω,
Kapazitätsmessung mit eingebautem Vergleichsnormal von 0,004 bis 0,5 μF sowie mit äußerem Normal von 0,4 bis 5× der Kapazität des Normals,
kapazitive Fehlerortung bei Aderriß (ohne Erdschluß),
Fehlerortung nach Murray an Stark- oder Schwachstromkabeln,
Fehlerortung nach Heinzelmann mit zwei Messungen, und zwar Ortung nach Murray und Vergleich der Hin- und Rückleitung (anzuwenden bei verschiedenen Hin- und Rückleitungswiderständen),
Fehlerortung nach der Dreipunktmethode mit zwei Messungen wie zuvor sowie Vergleich der Zuleitung zum Kabelanfang (anzuwenden, wenn Fehlerstelle nahe dem Kabelanfang),
Aderndifferenz-Messung, entsprechend der Fehlerortung mit künstlichem Fehler am fernen Ende,
Adernprüfung (Isolationsmessung) bis 1 MΩ als Vorprüfung zur Wahl der Meßverfahren.

Durch Wahl einer höheren Meßspannung (100 V) und Verwendung hochempfindlicher Lichtmarken-Galvanometer kann die Empfindlichkeit erhöht und der Meßbereich für Isolationsmessungen bis auf 25 MΩ erweitert werden.

**Hochspannungs-Kabelmeßbrücke.** Mit dieser Meßbrücke können an Starkstromkabeln verdeckte Fehler, die bei Niederspannungsmessungen ein Ausbrennen der Fehlerstelle erforderlich machen würden, oft ohne Ausbrennen geortet werden, weil auch bei hohem Fehlerübergangswiderstand ein genügend starker Meßstrom fließt. Die in Wheatstoneschaltung mit Schleifdraht und Zusatzwiderständen ausgelegte Brücke ist für 50 kV Betriebs-Gleichspannung isoliert und so ausgeführt, daß die Messungen ohne Gefahr für den Bedienenden sowie für das empfindliche Nullgalvanometer und die Brückenwiderstände durchgeführt werden können:

Alle Teile der Brücke sind auf einer Platte aus hochwertigem Isolierstoff vereinigt, die ihrerseits mit Isolierstangen auf dem Deckel des Transportkastens aufgestellt ist (Bild 152). Der Schleifdrahtschlitten wird vom Standort des Beobachters aus über eine mit Handrad versehende Isolierstange und eine Seilkupplung bewegt. Er nimmt dabei eine Ableselupe mit. Da sich auch vor der Galvanometerskale eine Lupe befindet, läßt sich die Brücke aus sicherer Entfernung abgleichen und ablesen.

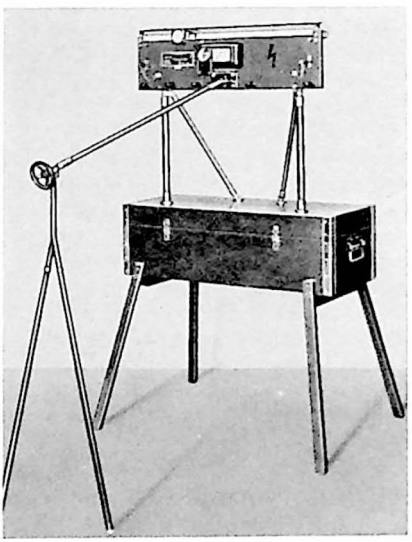


Bild 152
Hochspannungs-Kabelmeßbrücke

**MΩ-μF-Meßeinrichtung.** Die auf den Seiten 132 und 220 beschriebene Meßeinrichtung für Isolations- und Kapazitätsmessungen wird oft zusammen mit der Wheatstonemeßbrücke und der Kabelmeßbrücke (S. 210) benutzt und bildet in Verbindung mit ihr und bei Verwendung eines Doppelspul-Lichtmarken-Galvanometers (s. Tafel 50, S. 128) einen Meßsatz für vollständige Kabeluntersuchungen.

### Präzisions-Meßbrücken

Präzisions-Meßbrücken werden als Wheatstone- oder Thomson-Wheatstone-Meßbrücken (Doppelmeßbrücke) ausgeführt. Ihre Unterschiede gegenüber den entsprechenden Brücken der Serie kleiner Meßeinrichtungen (s. Seite 209) bestehen neben den genauer justierten Widerständen darin, daß nur ausgewählte Werkstoffe zur Verwendung kommen und daß der Aufbau und Zusammenbau aller Einzelteile besonders sorgfältig erfolgt. Dabei wird auf die Erzielung niedriger Übergangs- und Schaltungswiderstände sowie hoher Isolationswiderstände, äußerste Konstanz der garantierten Werte und auch geringste Abhängigkeit von äußeren Einflüssen Wert gelegt.

Die *Widerstände* entsprechen in der Ausführung den Beglaubigungsvorschriften der PTB. Sie sind praktisch völlig konstant; ihr Abgleich (an den Kontakten gemessen) wird bei Werten von 1 Ω und mehr auf mindestens ± 0,02% vom Sollwert vorgenommen, bei 0,1 Ω auf ± 0,1% und bei 0,01 Ω auf ± 0,5%. Die zulässige Belastung beträgt für jede Stufe von 1 Ω aufwärts 2 W; die 0,1-Ω-Stufen dürfen nur mit 0,4 W belastet werden.

*Präzisions-Drehschalter* (Bild 153) entsprechen höchsten Anforderungen an Kontaktsicherheit und Dauerhaftigkeit. Sie haben drei federnde Kontaktbrücken aus hartem Feinsilberblech, die gleichmäßig auf den hartsilberplattierten Kontaktflächen aufliegen und einen konstanten, niedrigsten Übergangswiderstand gewährleisten. Bei den *Stöpselkontakten* (Bild 154), die heute nur noch für einige Sondergeräte zum Einstellen kleiner Widerstände benützt werden, sind die Kontaktklötze tief in die Montageplatte eingelassen. Da ferner elektrisch zusammengehörige Kontakte durch elastische Zwischenglieder miteinander verbunden sind, sichert diese Konstruktion einen immer mit der ganzen Fläche anliegenden festen Sitz der Stöpsel.

Die *Montageplatte* wird bei Präzisions-Meßbrücken durch eine besondere Schutzplatte dem Einfluß der Sonnenbestrahlung entzogen und vor Verschmutzung gesichert. Diese Platte trägt die für die Bedienung erforder-

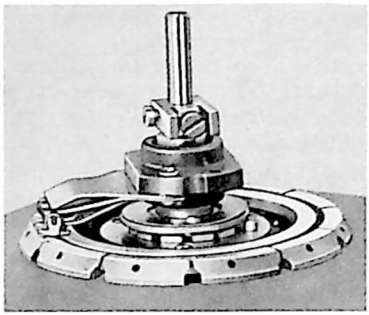


Bild 153 Aufbau des Präzisions-Drehschalters

liche Beschriftung. Bei den Drehschaltermeßbrücken sind kleine Einblickfenster vorgesehen, durch die die Einstellung der Schalter abgelesen werden kann.

Da die erzielbare *Meßgenauigkeit* sowohl von den Eigenschaften der Brücke als auch von der Empfindlichkeit des verwendeten Galvanometers, vom Meßstrom, der Größe des zu messenden Widerstandes und bei kleinen Widerständen auch von der äußeren Schaltung abhängt, kann eine absolute Wertangabe nicht gemacht werden. Bei ganz genauen Messungen kann man die unvermeidlichen Justierfehler der Widerstände durch Korrekturen nach einer für alle Schalterstellungen ausgeführten Korrekturentabelle im Beglaubigungsschreiben der PTB berücksichtigen.

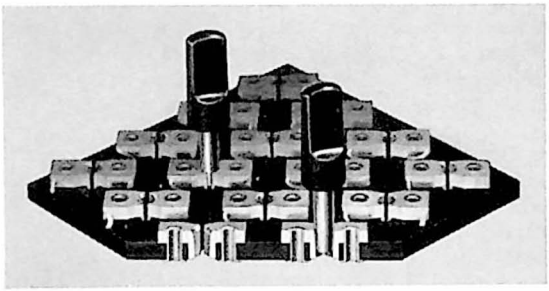
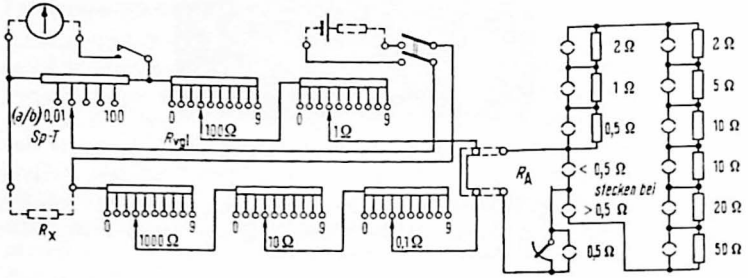


Bild 154 Ausführung der Stöpselkontakte

**Präzisions-Drehschaltermeßbrücke** (Bild 144, *c*, S. 208). Die Schaltung dieser Wheatstonemeßbrücke, die auch für Messungen mit Wechselstrom bis 500 Hz benutzt werden kann, zeigt Bild 155. Mit einem Vergleichswiderstand $R_{vgl}$ von $9 \times 0{,}1$ bis $9 \times 1000\ \Omega$ und dem am Spannungsteiler *Sp-T* von 0,01 bis 100 abgreifbaren Widerstandsverhältnis $a/b$ hat sie einen Einstellbereich von 0,001 bis $10^6\ \Omega$. Dadurch, daß für $a/b$ ein Spannungs-




*Sp-T* Spannungsteiler $(a/b)$ — $R_x$ zu messender Widerstand
$R_{vgl}$ Vergleichswiderstand — $R_A$ Ausgleichswiderstand

Bild 155 Drehschaltermeßbrücke

teiler verwendet wird, kann das Brückenverhältnis nicht durch den Übergangswiderstand gefälscht werden. Um den Widerstand längerer Zuleitungen zu $R_x$ und um den Schaltungswiderstand an den Vergleichswiderständen eliminieren zu können, läßt sich über zwei besondere (normalerweise durch eine Lasche überbrückte) Anschlußbolzen ein Ausgleichswiderstand $R_A$ anschließen, der mit Stöpseln und einem Schleifdraht zwischen 0 und 101 Ω fein einstellbar ist. Die Brückendiagonalen sind vertauschbar, damit man die größtmögliche Empfindlichkeit wählen kann.

**Präzisions-Drehschalter-Doppelmeßbrücke.** Für diese Thomson-Wheatstone-Meßbrücke gilt im Prinzip die gleiche Schaltung wie für die Betriebsmeßbrücke in Bild 150, S. 213, jedoch dient hier als Verhältniswiderstand $(a/b)$ für die Wheatstonemessungen ein besonderer Spannungsteiler (1000 Ω) mit direkt einzustellenden Verhältnissen von 0,001 bis 1000, so daß, wie bei der Präzisions-Drehschaltermeßbrücke, der Übergangswiderstand das Brückenverhältnis nicht fälscht. Wo die sehr geringen

Schaltungswiderstände der Präzisions-Drehschalter noch nachteilig wirken könnten, wie z.B. an den Galvanometerabgriffen der Stufen-Verhältniswiderstände bei der Thomsonschaltung, sind die Schaltungswiderstände durch eine besondere Schaltung auf die hochohmigere Seite verlegt, damit ihr Einfluß vernachlässigbar ist. Die Meßbrücke ermöglicht daher (bei Verwendung eines Normalwiderstandssatzes von 0,0001 bis 0,1 Ω) genaueste Messungen im Bereich von $10^{-7}$ bis $10^{6}$ Ω; der Einstellbereich geht hinunter bis $10^{-8}$ Ω. Die Messungen sind sehr rasch ausführbar, da mit einem Meßartschalter von der einen zur anderen Meßart umgeschaltet werden kann und dabei die nicht benötigte Batterie zwangsläufig abgetrennt wird; es können also die Batterien für beide Schaltungen ständig angeschlossen bleiben.

# XI. Kapazitäts- und Induktivitätsmessung

**MΩ-μF-Meßeinrichtung.** Mit dieser auf Seite 132 kurz beschriebenen Meßeinrichtung (s. auch S. 216) kann man Isolationswiderstände und Kapazitäten betriebsmäßig messen.

Die Kapazitätsmessung wird als ballistische Messung durchgeführt, d.h., die unbekannte Kapazität $C_x$ und ein Normalkondensator $C_N$ werden nacheinander an die gleiche Spannung gelegt und die Ladungsmengen bei der Aufladung oder Entladung mit einem Galvanometer gemessen: Die Galvanometerausschläge $\alpha_x$ und $\alpha_N$ verhalten sich im allgemeinen wie die Kapazitäten. In die Messungen geht aber noch die jeweilige Empfindlichkeiteinstellung $n$ des Galvanometers (Drehschalter in Bild 85, S. 132) ein, so daß $C_x$ nach folgender Gleichung zu ermitteln ist:

$$C_x = C_N \frac{n_x \alpha_x}{n_N \alpha_N}.$$

Bei ballistischen Messungen ist zu beachten, daß der ballistische Stoß stets kurzzeitig ablaufen muß; er soll bereits beendet sein, bevor das Galvanometer merklich ausschlägt. Läßt sich diese Forderung bei sehr großen Kapazitäten nicht einhalten, weil die Lade- oder Entladezeit des Kondensators gegenüber der Schwingungsdauer des Galvanometers zu groß ist, so muß ein Korrekturfaktor berücksichtigt werden, der einer den Geräten beigegebenen Kurvenschar entnommen werden kann. Verwendet man jedoch einen äußeren Normalkondensator, dessen Kapazität etwa der zu messenden entspricht, dann sind die Fehler beim Einstellen auf $C_N$ und beim Messen gleich groß und gehen nicht in das Ergebnis ein. Die Möglichkeit, ein äußeres Vergleichsnormal anschalten zu können, gestattet die Verwendung der Meßeinrichtung als Sortiergerät. Indem man am Galvanometer eine obere und untere Toleranzgrenze festlegt, kann man eine Fabrikationsserie, ohne jede einzelne Kapazität zu berechnen, mit dem Normal vergleichen.

**RLC-Meßbrücke** (Bild 156). Die *RLC*-Meßbrücke dient zur Messung von ohmschen Widerständen $R$ zwischen 0,1 Ω und 11 MΩ (8 Meßbereiche), von Selbstinduktivitäten $L$ und eisenlosen Gegeninduktivitäten $M$ zwischen 10 mH und 1100 H (je 5 Meßbereiche), von Kapazitäten $C$ zwischen 10 pF und 1100 μF (8 Meßbereiche) und von Scheinwiderständen $Z$ zwischen 0,1 Ω und 11 MΩ (8 Meßbereiche). Außerdem kann man mit ihr unter Verwendung von außen anzuschließenden Normalien auch Vergleichsmessungen der genannten Größen zwischen dem 0,1- und

10fachen des Normal-Wertes (2 Meßbereiche) und Prozentvergleichsmessungen zwischen „Normal-Wert − 20%" und „Normal-Wert + 20%" (2 Meßbereiche) durchführen. — Bei Induktivitäts- und Kapazitätsmessungen läßt sich die Größenordnung des Verlustfaktors durch einen Phasenabgleich ermitteln.

Die Meßeinrichtung besteht im wesentlichen aus einer Brücke, die in ihrer einfachsten Schaltung zur Messung rein ohmscher Widerstände als Wheatstonemeßbrücke (vgl. Bild 146, S. 210) bekannt ist und bei der für Induktivitäts-, Kapazitäts- und Scheinwiderstandsmessungen zwei Zweige sinngemäß durch Blindwiderstände ergänzt werden; die unbekannte Meßgröße bildet einen dieser beiden Zweige. In der Diagonale (Nullzweig) liegen ein Meßverstärker und eine Abstimm-Anzeigeröhre („Magisches Auge"). Die Brückenschaltung kann über den Netzteil mit Gleich- oder 50-Hz-Wechselspannung (2 V) gespeist werden oder von einem getrennten Gerät (Summer) mit Tonfrequenz bis 5000 Hz (max. 30 V). Die Genauigkeit der Brückenmessung wird durch die Genauigkeit der eingebauten und gegebenenfalls außen anzuschließenden Normalien bestimmt und ist unabhängig von der Anzeigeempfindlichkeit und von Schwankungen der Meßspannung.

Bild 156 *RLC*-Meßbrücke

**Kapazitätsmessungen mit Strom- oder Spannungsmesser.** Eine gelegentliche Kapazitätsmessung läßt sich auch mit einem Drehspulinstrument mit Gleichrichter, beispielsweise mit dem A-V-Ω-MULTIZET, ausführen. Wird das Instrument als Strommesser in Reihe mit einem Kondensator und einer Wechselspannungsquelle geschaltet, so ist der gemessene Strom $I$ hauptsächlich von der Kapazität $C_x$ des Prüflings, von der

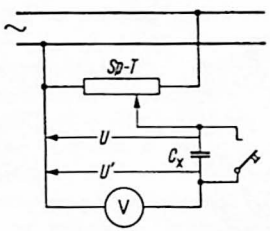
Höhe der Meßspannung $U$ und von deren Frequenz abhängig. Bei sinusförmiger Wechselspannung und vernachlässigbar kleinem Wirkwiderstand gilt

$$I = \frac{U}{1/\omega C_x} = U\,\omega C_x \quad \text{und} \quad C_x = \frac{I}{\omega\,U}.$$

Wegen der Gefährdung des Instruments bei einem Durchschlag des Prüflings ist es besser, anstelle eines Strombereiches einen Spannungsbereich zu benutzen. Dann ist jedoch der Innenwiderstand $R_i$ des Instruments beim jeweiligen Spannungsbereich zu berücksichtigen. Die zu messende Kapazität wird in der Schaltung entsprechend Bild 157 angeordnet. In zwei Meßvorgängen ist $C_x$ zu ermitteln. Zuerst wird bei kurzgeschlossenem Prüfling die Meßspannung auf den Sollwert $U$ eingestellt und dann nach Aufheben des Kurzschlusses am Prüfling der kleinere Ausschlag $U'$ abgelesen:

$$U' = \frac{U R_i}{\sqrt{R_i^2 + \left(\frac{1}{\omega C_x}\right)^2}} \quad \text{und} \quad C_x = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{U R_i}{U'}\right)^2 - R_i^2}}.$$

Mit den Spannungsbereichen 3 V~ bis 600 V~ des A-V-Ω-MULTIZET läßt sich ein Kapazitätsbereich von 40 µF bis etwa 1000 pF erfassen.




*Sp-T* Spannungsteiler
$C_x$ Prüfling
$U$ Meßspannung
$U'$ Spannung bei eingeschaltetem Prüfling

Bild 157 Kapazitätsmesssung mit einem Spannungsmesser

# XII. Verlustfaktormessung

Zur Messung der Kapazität $C_x$, des Verlustfaktors $\tan \delta_x$ und der relativen Kapazitätsänderung $\Delta C_x/C_{x0}$ von z.B. Kondensatoren, verlegten oder unverlegten Kabeln, Freileitungen und Isolierstoffen (zwischen Elektroden), verwendet man die Universal-$C$-tan $\delta$-Meßbrücke. Sie eignet sich gleichermaßen für Einzeluntersuchungen und für Reihenprüfungen. Es besteht die Möglichkeit, $\tan \delta_x$ und $\Delta C_x/C_{x0}$ bei vollautomatischem Brückenabgleich mit Linienschreibern zu registrieren und an einem Elektronenstrahl-Oszillograph den Beginn der Glimmentladung am Prüfling während der Messung zu kontrollieren. Auch der vom Gerät angezeigte Scheitelwert der Prüfspannung kann registriert werden.

Die Universal-$C$-tan $\delta$-Meßbrücke entspricht im Grundprinzip der Scheringbrücke zur $C_x$- und tan $\delta_x$-Messung (Bild 158), bei der der Kapazitätsabgleich an den Präzisionswiderständen $R_N$ (dekadisch gestuft) und $R_x$ und der Verlustwinkelabgleich an der Kapazität $C_\delta$ vorgenommen wird:

$$C_x = C_N\,(R_N/R_x), \qquad \tan \delta_x = R_N\,\omega\,C_\delta.$$

Da $C_x$ umgekehrt proportional $R_x$ ist, muß $C_x$ berechnet werden; $\tan \delta_x$ ist an der $C_\delta$-Einstellung direkt ablesbar. Bei der Universal-$C$-tan $\delta$-Meßbrücke (Bild 159) sind nun im Gegensatz zur Scheringbrücke $R_x$ stufig und $R_N$ stetig einstellbar, und die Restspannung des Diagonalzweiges wird nicht auf Null abgeglichen, sondern nach Übersetzung durch den Wandler $DW$ mit Hilfe eines komplexen Kompensators $K$ über den elektronischen Nullindikator $EN$ (s. S. 149) kompensiert. Der Kompensator liefert an seine beiden Potentiometer $P_1$ und $P_2$ zwei um 90° phasenverschobene Teilspannungen, die gegenüber der Spannung an $R_N$, seiner Speisespannung, um 0° oder 180° (linke oder rechte Hälfte von $P_1$) bzw. um 90° ($P_2$) phasenverschoben sind. Die Spannungen an $P_1$ und $P_2$ liegen in Phase mit den Komponenten der Diagonalspannung aus der relativen Kapazitätsänderung $\Delta C_x/C_{x0}$ und dem Verlustfaktor $\tan \delta_x$. Durch diese

$C_N$ Verlustfreies Kapazitätsnormal
$C_x$ Zu messende Kapazität
$\delta_x$ Zu messender Verlustwinkel
$R_N$, $R_x$ Kapazitätsabgleich-Widerstand
$C_\delta$ Verlustwinkelabgleich-Kapazität
$G$ Nullindikator

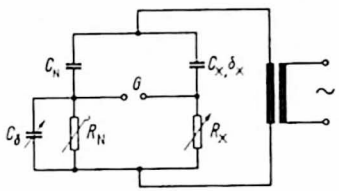



Bild 158
Scheringbrücke, Grundschaltung

Maßnahmen können $C_x$, $\tan \delta_x$ und auch $\Delta C_x/C_{x0}$ gemessen sowie die beiden letztgenannten Größen registriert werden.

Der Meßvorgang ist grundsätzlich folgender: Bei auf Null gestelltem $P_1$ und nach passender Wahl von $R_x$ (Grobabgleich) wird $R_N$ (Feinabgleich) so verändert, daß $EN$ minimalen Ausschlag zeigt. Dieses Minimum, d.h. die vom Verlustwinkel des Prüflings herrührende Restspannung in der Diagonale, ist durch abwechselndes Einstellen von $P_2$ (bei entsprechend gewählter Übersetzung des Diagonalwandlers $DW$) und Nachstellen von $R_N$ so lange zu verkleinern, bis $EN$ Null anzeigt. Die Kapazität des Prüflings ist dann an der Einstellung von $R_N$ unter Berücksichtigung der von $R_x$ und der Verlustfaktor an der Skale von $P_2$ unter Berücksichtigung der Übersetzung von $DW$ abzulesen. Ändern sich diese Werte, z.B. in Abhängigkeit von der Prüfspannung oder der Temperatur, d.h. tritt wieder eine Diagonalspannung auf, so ist die weitere Kompensation an $P_1$ und $P_2$ vorzunehmen, wobei die Einstellung von $P_1$ unmittelbar $\Delta C_x/C_{x0}$ angibt. — Der Scheitelwert der Prüfspannung wird über den Ladestrom von $C_N$ ermittelt und mit einem Gleichrichterinstrument gemessen.

Beim vollautomatischen Brückenabgleich zur Registrierung treten an die Stelle von $P_1$, $P_2$ zwei jeweils mit Zeiger und Schreiborgan fest gekuppelte Potentiometer. Diese sind in die Schreiber eingebaut und werden von phasenabhängigen Nullmotoren selbsttätig entsprechend verstellt.

Einpolig geerdete Prüflinge werden in Verbindung mit einem Zusatzgerät $ZG$ gemessen, ohne daß die Meßbrücke auf Hochspannungspotential gelegt werden muß. Am $ZG$ werden die Erdkapazitäten und Verlustwerte der Spannungserzeugeranlage abgeglichen. — Zuleitungskapazitäten bis 6000 pF sind ohne Zusatzgerät kompensierbar. — Eine vollautomatische Schutzschaltung (in Bild 159 nicht gezeichnet) schützt $R_x$ vor thermischer Überlastung.

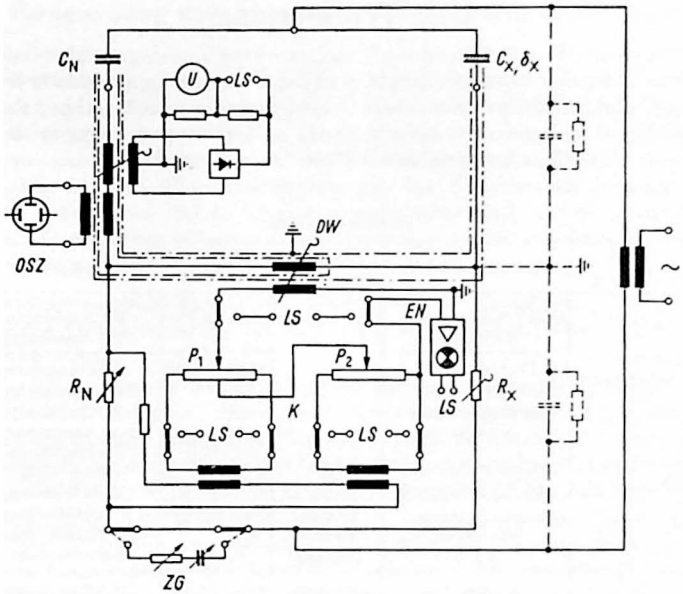
Die Meßbrücke, das Zusatzgerät sowie die Bedienungselemente für die Hochspannungserzeugung und Raumbeleuchtung können in einen Meßtisch eingebaut sein (für Messungen an kleineren Prüflingen bis 2 kV auch der Normalkondensator 2 kV, 50000 pF).

Die Universal-$C$-tan δ-Meßbrücke ist zum Anschluß an 220 V für zwei Frequenzen 50/125 Hz ausgelegt, kann aber auch für 50/60 Hz, 60/125 Hz, 50/150 Hz oder 60/150 Hz ausgeführt werden. Die Meßbereiche sind:

für $C_x$ 10 pF bis 2000 µF (bei Ladeströmen bis 30 A) und mit Zusatz-Normalwiderständen bis 50000 µF (bei Ladeströmen bis 1000 A),

für $\tan \delta_x$ $10^{-4}$ bis 1 (bezogen auf $C_{x0}$),

für $\Delta C_x/C_{x0}$ $\pm 0{,}5 \cdot 10^{-2}$ bis $\pm 0{,}5$.




$C_N$ verlustfreies Kapazitätsnormal
$C_x$ zu messende Kapazität
$\delta_x$ zu messender Verlustwinkel
$R_N$, $R_x$ Kapazitätsabgleich-Widerstände
*DW* Diagonalwandler
*EN* elektronischer Nullindikator
*K* komplexer Kompensator
$P_1$, $P_2$ Potentiometer zur Kompensation ($\Delta C_x/C_{x0}$, $\tan \delta_x$)
*LS* Anschluß für Registriereinrichtungen
*U* Scheitelwert der Prüfspannung
*OSZ* Oszillograph
*ZG* Zusatzgerät

Bild 159 Universal-*C*-tan δ-Meßbrücke, Grundschaltung

# XIII. Fernmessung

Unter einer Fernmessung versteht man die Übertragung von Meßwerten unter Zuhilfenahme besonderer Übertragungselemente: Geber, Fernleitung, Empfänger. Die verschiedenen Anforderungen zwingen dazu, verschiedene Fernmeßverfahren (s. Tafel 71) anzuwenden.

**Tafel 71** Fernmeßverfahren

| Übertragungsweg | Fernmeßverfahren | Übertragungsgröße | Reichweite [1]) | Meßgröße |
|---|---|---|---|---|
| Galvanisch durchgeschaltete Leitungen | Gleichrichtergeber-Verfahren | Gleichstrom | etwa 10 km | Wechselstrom und -spannung |
| | Drehmomentkompensations-(Meßumformer-)Verfahren | | etwa 40 km | Gleichstrom und -spannung, Wechelstrom und -spannung, Wechselstrom-Wirk- und Blindleistung, Drehstrom-Wirk- und Blindleistung, Netzfrequenz |
| | Impulsfrequenz-Verfahren | Gleichstrom-Impulse | etwa 100 km | |
| Abgeriegelte Leitungen (Schutzübertrager) | Fernmeßgeber-Verfahren für abgeriegelte Leitungen | Wechselstrom | etwa 10 km | Wechselstrom und -spannung |
| | Impulsfrequenz-Verfahren | Wechselstrom-Impulse | etwa 80 km [2]) | Gleichstrom und -spannung, Wechselstrom und -spannung, Wechselstrom-Wirk- und Blindleistung, Drehstrom-Wirk- und Blindleistung, Netzfrequenz |
| Trägerfrequenzsysteme | Impulsfrequenz-Verfahren für Trägerfrequenzsysteme (Frequenzmultiplex-Verfahren) | Tonfrequenz- oder Hochfrequenz-Impulse | praktisch unbegrenzt | |
| | Zeitmultiplex-Puls-Code-Verfahren | | | |

[1]) Von den Leitungsdaten abhängig.

[2]) Von der Anzahl der Schutzübertrager im Leitungszug abhängig.

## Fernmessung über galvanisch durchgeschaltete Leitungen

**Gleichrichtergeber-Verfahren.** Zur Fernmessung von Wechselströmen und Wechselspannungen werden die Meßgrößen über Meß- und Zwischenwandler umgeformt, gleichgerichtet und als meßwertproportionale Gleichströme von max. 1 mA zur Empfängerseite übertragen. Der Widerstand der Fernleitung (max. 1 kΩ) muß einjustiert werden. Zu beachten ist, daß Widerstandsänderungen des Außenkreises (Fernleitung und Instrument) nur so lange vernachlässigbar sind, wie sie gegenüber dem Geber-Innenwiderstand klein bleiben, und daß die Anzeige durch Störspannungen verfälscht werden kann.

**Drehmomentkompensations-(Meßumformer-)Verfahren** (Bild 160). Dieses Verfahren eignet sich zum Übertragen praktisch aller elektrischer Meßgrößen.

Der Meßumformer besteht aus einem auf die jeweilige Meßgröße abgestimmtem Meßwerk, einem mechanisch damit gekuppeltem Kompensationsmeßwerk und einem Transistor-Oszillator mit Gleichrichter und Verstärker. Vom beweglichen Organ des erstgenannten Meßwerks wird der Größe des Meß-Drehmoments $M_M$ entsprechend ein Abschirmfähnchen zwischen die Rückkopplungsspulen des Oszillators geschwenkt und so die Amplitude der HF-Schwingung gesteuert. Der HF-Strom wird dann gleichgerichtet und verstärkt. Bevor der erhaltene Gleichstrom zur Fernübertragung ausgenutzt werden kann, durchfließt er die Drehspule des Kompensationsmeßwerks und erzeugt dort ein Drehmoment $M_K$. Die Drehmomente $M_M$ und $M_K$ wirken einander entgegen und sind so abgestimmt, daß der Ausgangsstrom — in weiten Grenzen unabhängig von Änderungen der Versorgungsspannungen, der Eigenschaften der

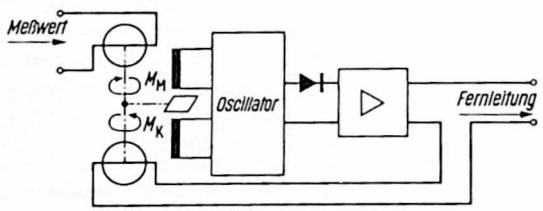



Bild 160 Meßumformer für das Drehmomentkompensations-Verfahren, Grundschaltung. $M_M$ Meß-Drehmoment, $M_K$ Kompensations-Drehmoment

Transistorschaltung oder des Fernleitungswiderstandes — immer der Meßgröße proportional bleibt (eingeprägter Gleichstrom).

Mit einer Zusatzschaltung kann der Meßumformer auch für Meßgrößen mit wechselnder Energierichtung (−···0···+) verwendet werden, so daß der Ausgangsgleichstrom mit der Meßgröße seine Richtung ändert. Dadurch können derartige Meßgrößen gemessen und ebenso wie die mit gleichen Vorzeichen summiert werden. Die Leistungssumme örtlich zusammenliegender Leitungssysteme wird z.B. mit einem Meßumformer gebildet, der mit mehreren gekoppelten elektrodynamischen Eingangsmeßwerken ausgerüstet ist. Bei räumlich getrennten Leitungssystemen können die Ausgangsströme der einzelnen Meßumformer in einem gemeinsamen Anzeiger addiert werden.

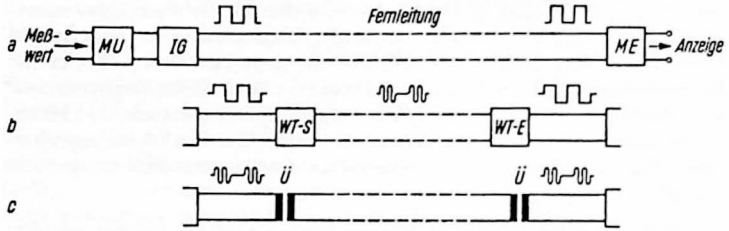
Impulsfrequenz-Verfahren s. unten.

## Fernmessung über abgeriegelte Leitungen (Schutzübertrager)

**Fernmeßgeber-Verfahren für abgeriegelte Leitungen.** Sind nur Wechselströme und Wechselspannungen zu messen, so werden die Meßgrößen über Meß- und Zwischenwandler in einen für die Übertragung günstigen Wechselstrom umgewandelt, der zur Anzeige an einem Drehspulinstrument erst auf der Empfängerseite gleichgerichtet wird. Für den Widerstand der Fernleitung usw. gilt das gleiche wie beim Gleichrichtergeber-Verfahren (s. S. 227).

**Impulsfrequenz-Verfahren** (Bild 161). Beim Impulsfrequenz-Verfahren wird der Ausgangsstrom eines oder mehrerer Meßumformer (vgl. Bild 160) mit einem Impulsgeber in eine meßwertproportionale Impulsfrequenz (5 bis 15 je s) umgesetzt. Der Impulsgeber besteht aus einer Kippstufe, aus einer Ausgangsschaltung für Einfachstrom-, Doppelstrom- oder Wechselstrom-Impulse und aus einer Netzanschlußschaltung.

Die Kippfrequenz der Transistor-Kippstufe ist nur von der angelegten Steuerspannung abhängig, die sich zusammensetzt aus dem Spannungsabfall des Meßstromes an einem Eingangswiderstand und aus einer mit Zenerdioden kostantgehaltenen Vortriebsspannung. Mit Hilfe dieser Vortriebsspannung wird bereits beim Meßwert 0 eine Impulsfrequenz ausgesandt und eine Meßwertübertragung mit Nullpunkt an beliebiger Stelle des Meßbereichs ermöglicht, z.B. für Leistungsmessung bei zweiseitiger Energierichtung. Die abgegebenen Gleichstromimpulse können direkt über eine galvanisch durchgeschaltete Leitung (Bild 161a) über-




MU Meßumformer
IG Impulsgeber
ME Meßempfänger
WT-S Wechselstromtelegrafie-Sender
WT-E Wechselstromtelegrafie-Empfänger
Ü Übertrager

Bild 161 Impulsfrequenz-Verfahren, Blockschaltungen

*a* mit galvanisch durchgeschalteter Fernleitung
*b* mit WT-Fernübertragung
*c* mit abgeriegelter Fernleitung

tragen oder zum Ansteuern eines Tonfrequenz- oder Trägerfrequenz-Übertragungssystems (Bild 161 b) benutzt werden. Die Ausgangsschaltung für Wechselstromimpulse wird bei direkter Übertragung über abgeriegelte Leitungen benötigt (Bild 161 c).

Die Empfangseinrichtung enthält eine monostabile Transistor-Kippschaltung, die bei jedem Anstieg und Abfall der ankommenden Meßimpulse einen Stromimpuls von genau definierter Dauer und Amplitude, also von konstanter Ladungsmenge, liefert. Diese Impulse werden geglättet und einem Anzeiger zugeführt, der den von der Impulsfrequenz und damit vom Meßwert abhängigen zeitlichen Mittelwert des Impulsstromes anzeigt.

## Fernmessung über Trägerfrequenzsysteme

Sollen Fernmeßwerte über Kabel, Hochspannungsleitungen oder Funkkanäle übertragen werden, dann setzt man Trägerfrequenzsysteme ein, mit denen eine Mehrfachausnutzung der Übertragungswege möglich ist.

**Impulsfrequenz-Verfahren für Trägerfrequenzsysteme (Frequenzmultiplex-Verfahren).** Die vom elektronischen Impulsgeber beim Impulsfrequenz-Verfahren erzeugten meßwertproportionalen Gleichstrom-Impulse werden dem Sende-Modulator zugeführt und tasten diesen im

Takt ihrer Impulsfrequenz (Bild 161b). Da das für die Nachrichtenübermittlung jeweils zur Verfügung stehende Frequenzband in eine Anzahl schmaler Frequenzbänder unterteilt ist und in jedem dieser Bänder ein Meßwert übertragen werden kann, lassen sich bei Wechselstromtelegrafie-Systemen bis zu 25 und bei Trägerfrequenzsystemen für Hochspannungsleitungen bis zu 18 Fernmeßwerte je Kanal gleichzeitig übertragen. In ähnlicher Weise können Funkkanäle mehrfach ausgenutzt werden.

**Zeitmultiplex-Puls-Code-Verfahren.** Nach diesem Verfahren werden mehrere Meßwerte zeitlich nacheinander (zeitmultiplex) über einen Übertragungskanal gegeben. Dazu schalten auf der Sende- und Empfangsseite synchron laufende Verteiler in zyklischer Folge je eine Meßstelle und den zugeordneten Anzeiger ein. Die Zeit für einen Verteiler-Umlauf hängt von der Anzahl der Meßstellen (max. 20) und der auf der Übertragungsstrecke zulässigen Impulsfrequenz ab. Bei 10 Meßstellen und der bei der Wechselstromtelegrafie üblichen Telegrafiergeschwindigkeit von 50 Baud beträgt sie z. B. etwa 2 s.

Als digitales Verfahren (Puls-Code) bietet dieses Fernmeßverfahren eine hohe Übertragungssicherheit und große Vorteile für die Weiterverarbeitung der Meßwerte. Der als Gleichstrom oder Gleichspannung zum Sender kommende Meßwert wird als Impulsfolge von acht Strom- oder Pausenschritten (ähnlich einem Fernschreibzeichen) verschlüsselt, wobei der jeweilige Meßbereich in 200 Stufen unterteilt ist.

Sende- und Empfangseinrichtung bestehen aus Kippstufen, Verstärkern, Oszillatoren und weiteren Schaltungseinheiten, die zum größten Teil als Flachbaugruppen in gedruckter Schaltung mit Transistoren ausgeführt sind und in Schrankgestellen für maximal 10 oder 20 nutzbare Verteilerschritte untergebracht werden.

# XIV. Eisen-Meßeinrichtungen

## Allgemeines

Für die Leistungsfähigkeit elektrischer Maschinen, Einrichtungen und Geräte sind die magnetischen Eigenschaften des verwendeten Eisens von ausschlaggebender Bedeutung, d.h., für eine fehlerfreie Berechnung, Konstruktion und Fertigung ist die genaue Kenntnis dieser Eigenschaften unbedingt vorauszusetzen. Man erhält sie, wenn man eine Probe des Werkstoffs mit Gleich- oder Wechselstrom magnetisiert und dabei die magnetische Feldstärke $H$ und die magnetische Induktion $B$ messend verfolgt

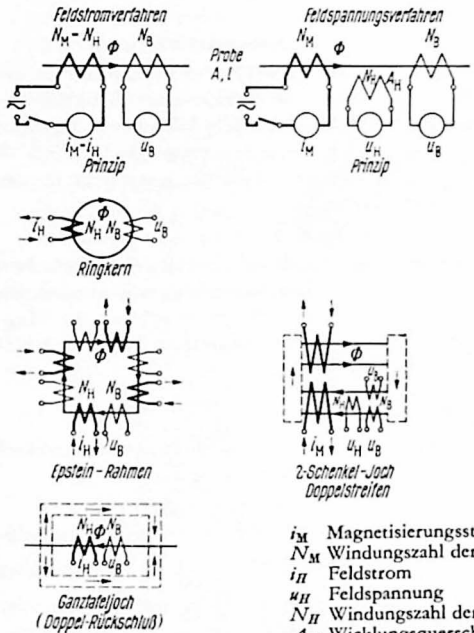



Bild 162 Verfahren zur Umwandlung von magnetischen Kenngrößen in elektrische Meßgrößen; Beispiele für Jochformen.

$i_M$ Magnetisierungsstrom
$N_M$ Windungszahl der Magnetisierungswicklung
$i_H$ Feldstrom
$u_H$ Feldspannung
$N_H$ Windungszahl der Feldstärkewicklung
$A_H$ Wicklungsquerschnitt der Feldstärkewicklung
$u_B$ Induktionsspannung
$N_B$ Windungszahl der Induktionswicklung
$\Phi$ Magnetischer Fluß
$A$ Eisenquerschnitt
$l$ mittlere Eisenlänge

sowie die Ummagnetisierungsleistung $P$ (Erwärmung in einem Wechselfeld) bei einem bestimmten Probengewicht $G$ ermittelt. Dazu versieht man die Probe entsprechend Bild 162 bei Messungen nach dem Feldspannungsverfahren mit einer Magnetisierungs-, einer Feldstärke- und einer Induktionswicklung; bei Messungen nach dem Feldstromverfahren sind die Magnetisierungs- und die Feldstärkewicklung identisch. Als Jochformen dienen meist: Ringkerne, Streifenkerne (Epstein-Rahmen mit Streifen 3 cm × 50 cm, Probengewicht 10 kg, Induktionen bis 15000 G; Streifenjoche mit Streifen 3 cm × 50 cm, Probengewicht 1 kg und Leitpaketgewicht 10 bis 16 kg oder Probengewicht 1 kg, Induktionen bis 20000 G) und Ganztafeljoche mit Induktionen bis 15000 G.

## Messungen mit Gleichstrommagnetisierung

Messungen bei Gleichstrommagnetisierung werden nach der *ballistischen Methode* durchgeführt: Durch Schließen und Öffnen eines Schalters im Stromkreis der Magnetisierungswicklung (vgl. Bild 162) wird der vom Magnetisierungsstrom $i_M$ in der Probe induzierte magnetische Fluß $\Phi$ plötzlich auf- oder abgebaut und induziert dadurch seinerseits in der Induktionswicklung einen Spannungsstoß

$$\int u_B \, dt = N_B \, A \, B,$$

der als Maß für die magnetische Induktion $B$ in G mit einem ballistischen Galvanometer gemessen wird. Da beim *Feldstromverfahren* der Magnetisierungsstrom $i_M$ als Feldstrom

$$i_H = \frac{l H}{N_H}$$

und beim *Feldspannungsverfahren* die Feldspannung

$$\int u_H \, dt = \mu_0 \, N_H \, A_H \, H$$

ein Maß für die magnetische Feldstärke $H$ in $\frac{A}{cm}$ ist, läßt sich also nach beiden Verfahren unter Verändern von $i_M$ die Magnetisierungskurve $B = f(H)$ (Bild 163) aufnehmen. Sie gibt unmittelbar über die magnetischen Eigenschaften der Probe Aufschluß.

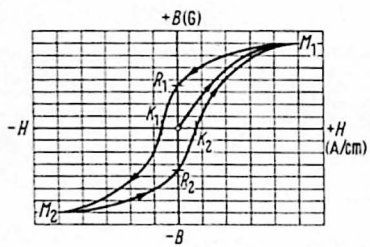



Bild 163
Magnetisierungskurve $B = f(H)$,
Beispiel.
0—$M_1$ jungfräuliche Kurve der Induktion,
0—$R_1$ und 0—$R_2$ Remanenz $B_r$ (zurückbleibender Magnetismus),
0—$K_1$ und 0—$K_2$ Koerzitivfeldstärke $H_c$ (Feldstärke zur Aufhebung von $B_r$),
$M_1$—$M_2$—$M_1$ Hysteresisschleife

Die von der Hysteresisschleife begrenzte Fläche entspricht der *Ummagnetisierungsleistung* (Hysteresisverlust je Zyklus), die bei magnetisch weichem Eisen geringer ist als bei magnetisch hartem.
Messungen mit Gleichstrommagnetisierung werden hauptsächlich bei Proben mit großen Querschnitten durchgeführt, weil bei diesen die Wirbelstromverluste bei Wechselstrommagnetisierung das Meßergebnis fälschen würden.

## Messungen mit Wechselstrommagnetisierung

Weil die meisten Elektrobleche für Wechselstrommagnetisierung bestimmt sind, werden sie zweckmäßigerweise auch bei Wechselstrommagnetisierung untersucht. Dazu stehen, je nach Aufgabenstellung, zur Verfügung: Das Universal-FERROMETER, die fahrbare Epstein-Meßeinrichtung und die Ganztafel-Meßeinrichtungen.

**Universal-FERROMETER.** Das FERROMETER (Bild 164) dient zum schnellen und genauen Messen der magnetischen Kennwerte von Eisenproben aller Art, und zwar sowohl von Band- und Ringkernen, als auch von fertig gestanzten Blechen kleiner Transformatoren und Motoren. Jede Eisenprobe wird mit einer Primärwicklung und einer Sekundärwicklung, die die Meßspannung zum Bestimmen der Induktion liefert, versehen. Die Meßspannung für die Feldstärke wird bei Proben, die in

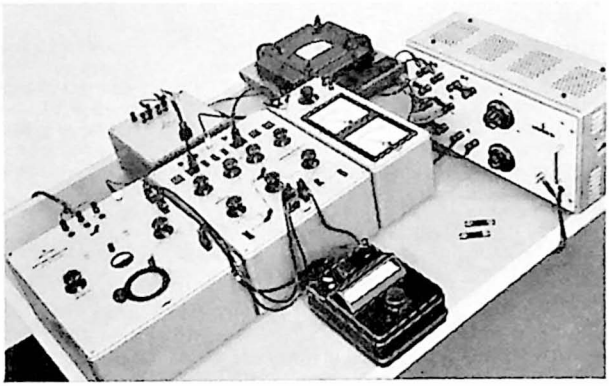
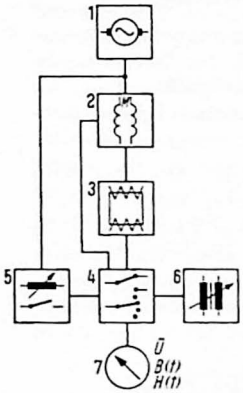


Bild 164 Meßplatz mit Universal-FERROMETER zum Bestimmen des zeitlichen Verlaufs der Feldstärke- oder Induktionskurve

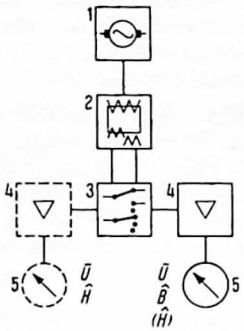
Form eines geschlossenen magnetischen Kreises angeordnet sind (z. B. 25-cm-Epsteinrahmen), einer Gegeninduktivität im Erregerkreis entnommen, und bei Proben in Form eines magnetischen Kreises mit Luftspalt (z. B. 50-cm-Epsteinrahmen) einer Feldmeßspule. Aus den Mittelwerten dieser Spannung lassen sich die Augenblicks- und Scheitelwerte der Induktion und Feldstärke bestimmen.

Die Bausteine des Universal-FERROMETER sind in den Bildern 165 bis 167 für die verschiedenen Messungen zusammengestellt.



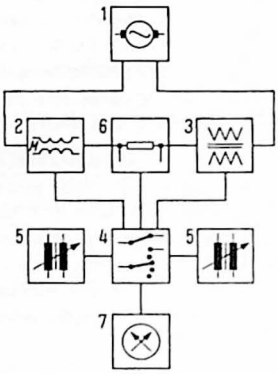

1 Stromversorgungsgerät
2 Gegeninduktivität
3 25-cm- oder 50-cm-Epsteinrahmen
4 Meßkreis- und Meßbereichwähler
5 Schwingkontaktgleichrichter
6 Dekaden-Spannungswandler
7 Hochempfindliches Drehspulinstrument

Bild 165
FERROMETER-Meßplatz zum Bestimmen von Augenblickswerten, Grundschaltung




1 Stromversorgungsgerät
2 50-cm-Epsteinrahmen oder Gegeninduktivität und 25-cm-Epsteinrahmen
3 Meßkreis- und Meßbereichwähler
4 Präzisions-Meßverstärker
5 Präzisions-Drehspulinstrument

Bild 166
FERROMETER-Meßplatz zum Bestimmen der Magnetisierungskennlinie $\hat{B} = f(\hat{H})$, Grundschaltung




1 Stromversorgungsgerät
2 Gegeninduktivität
3 Probe mit Magnetisierungs- und Induktionswicklung, z. B. 25-cm-Epsteinrahmen
4 Meßkreis- und Meßbereichwähler
5 Dekaden-Spannungswandler
6 Nebenwiderstand
7 Elektron. Nullindik.

Bild 167
Mikro-FERROMETER-Meßplatz, Grundschaltung

Die Augenblickswerte der Induktion und der Feldstärke werden mit dem FERROMETER-Grundgerät gemessen: Ein gesteuerter Kontaktgleichrichter in Vollwellenschaltung schaltet Halbperioden der Meßspannung im Takt der Meßfrequenz auf ein *Drehspulinstrument*. Der *angezeigte Mittelwert der Meßspannung entspricht dem Augenblickswert der Induktion oder der Feldstärke* im Schaltmoment. Durch Verschieben der Schaltphase können einzelne Zeitpunkte der Induktionskurve abgetastet werden. Die einander zeitlich zugeordneten Werte für Induktion und Feldstärke ergeben die *Hysteresisschleife* $B = f(H)$. Durch Ausplanimetrieren der Hysteresisschleife oder nach der „Zweifaktorenmethode" werden die *Ummagnetisierungsverluste* bestimmt. Bei der letztgenannten Methode kann der Blindanteil des Magnetisierungsstromes durch Dekaden-Spannungswandler kompensiert werden.

Die *Scheitelwerte der Induktion und der Feldstärke* werden über eine Verstärkerschaltung mit selbststeuernden Trockengleichrichtern von einem *Drehspulinstrument* angezeigt. Mit dieser Schaltung kann man die *Magnetisierungskennlinie* $\hat{B} = f(\hat{H})$ ohne zeitraubendes Einstellen der Maximalwerte von Induktion und Feldstärke aufnehmen. Der Meßkreis wird praktisch nicht belastet, da über Präzisions-Meßverstärker mit starker Gegenkopplung gemessen wird. Beim Arbeiten mit getrennten Zweigen für die $\hat{B}$- und $\hat{H}$-Messung werden beide Werte gleichzeitig angezeigt.

Die magnetischen Kennwerte im Bereich der Anfangspermeabilität lassen sich mit dem *Mikro-FERROMETER* ermitteln. Mit dieser Einrichtung können selbst kleinste Proben mit höchster Empfindlichkeit gemessen werden. Die Messung erfolgt nach einem Kompensationsverfahren: Die Grundwelle der Probenspannung wird durch Kompensationsspannungen nach Wirk- und Blindanteil bestimmt. Die Kompensationsspannungen aus Gegeninduktivität und Nebenwiderstand werden über Dekaden-Spannungswandler gewonnen. Ein elektronischer Nullindikator zeigt den genauen Abgleich an. — Die magnetischen Kennwerte lassen sich mit den beim Abgleichen eingestellten Werten $\omega L$ und $R$ berechnen.

**Fahrbarer Epstein-Meßplatz.** Dieser Meßplatz ist für Schnellmessungen im Betrieb ohne Korrekturen des Eigenverbrauchs der Meßinstrumente bestimmt. (Alle Meßspannungen werden von Präzisions-Meßverstärkern in eingeprägte Ströme umgesetzt, so daß der Probenkreis praktisch nicht belastet wird.)

Die für die Güte von Elektroblechen kennzeichnenden *Ummagnetisierungsverluste* werden mit einem *Leistungsmesser* bestimmt. Während sein Strom-

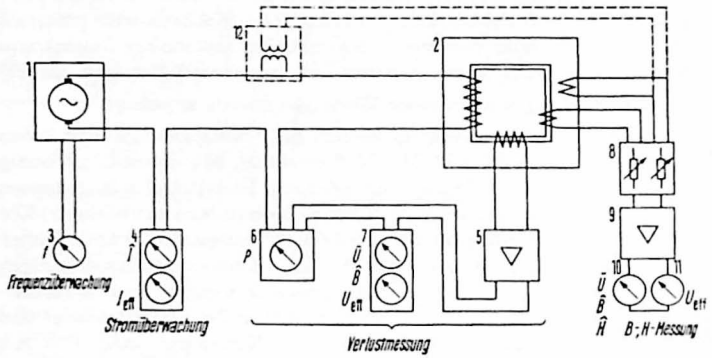
pfad im Erregerkreis liegt, wird der Spannungspfad von der Induktionswicklung über einen Verstärker gespeist. Im Spannungspfad liegen außerdem ein *Mittel- und ein Effektivwert-Spannungsmesser.*

Größe und Formfaktor der Induktion können, ohne das Meßergebnis zu fälschen, ständig kontrolliert werden.

Die *Magnetisierungskennlinie* $\hat{B} = f(\hat{H})$ wird über eine Verstärkerschaltung mit einem Drehspulinstrument aufgenommen. Dazu werden die der Feldstärke oder der Induktion entsprechenden Spannungen über je einen Meßbereichwähler verstärkt auf das *Drehspulinstrument, das die Scheitelwerte der Feldstärke oder der Induktion* anzeigt, und auf das *Effektivwert-Instrument* geschaltet.

Zum Überwachen des Magnetisierungsstromes dient der *Scheitel- und Effektivwert-Strommesser.* Außerdem wird die *Meßfrequenz* ständig kontrolliert.

Zum 25-cm-Epstein-Meßplatz gehören ein fahrbares Meßpult, ein 25-cm-Epsteinrahmen mit einer Gegeninduktivität, ein Leistungsmesser mit




1 Stromversorgungsgerät
2 50-cm-Epsteinrahmen
3 Frequenzmesser
4 Scheitel- und Effektivwert-Strommesser
5 Präzisions-Meßverstärker 10 V/30 mA
6 Präzisions-Leistungsmesser
7 Effektiv- und Mittelwert-Spannungsmesser
8 Meßbereichwähler
9 Präzisions-Meßverstärker 7,25 mV/3 mA
10 Präzisions-Drehspulinstrument
11 Präzisions-Dreheiseninstrument
12 Gegeninduktivität zum 25-cm-Epsteinrahmen

Bild 168 Epstein-Meßeinrichtung zum Messen der Ummagnetisierungsverluste und der Magnetisierbarkeit, Grundschaltung

0,5/1 A Strommeßbereich sowie ein tragbares 1-kVA-Stromversorgungsgerät; zum 50-cm-Epstein-Meßplatz gehören das Meßpult, ein 50-cm-Epsteinrahmen, ein Leistungsmesser mit 2,5/5 A Strommeßbereich sowie ein fahrbares Stromversorgungsgerät mit einer Leistung von 11 kVA.

**Ganztafel-Meß- und Sortiereinrichtung.** Zur Fertigungskontrolle und zum Sortieren der Bleche nach Güteklassen wird die Ganztafel-Meß- und Sortiereinrichtung verwendet (Bild 169). Sie besteht aus dem Einlauftransporttisch, der Waage, dem Meßaufsatz, dem Magnetisierungsjoch, dem Auslauftisch und der spannungsgeregelten Stromversorgungsanlage.

Nach Einstellen der Konstanten und Wahl der Sortierung durchlaufen die Blechtafeln die Meßeinrichtung. Die auf den Einlauftransporttisch gelegte Blechtafel wird auf eine Differentialwaage gefahren und gewogen. Die Waage zeigt die prozentuale Abweichung des Tafelgewichts an, bezogen auf den Sollwert, der für die Blechsorte festliegt. Diese Abweichung entspricht zugleich der Abweichung der Blechdicke von ihrem Sollwert. Mit dem als Folgezeiger ausgeführten Sollwertsteller wird die Induktion entsprechend der Gewichtsabweichung korrigiert. Ein Leistungsmesser zeigt die Ummagnetisierungsverluste der Blechtafel in W/kg an und eine Stempeleinrichtung druckt die dem abgelesenen Wert entsprechende Güteklasse auf die auslaufende Tafel. Währenddessen ist die zweite Blechtafel bereits gewogen worden und läuft in das Meßjoch ein.

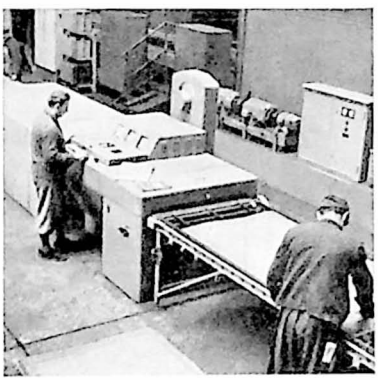


Bild 169 Ganztafel-Meß- und Sortiereinrichtung für Elektrobleche im Produktionsgang eines Walzwerkes. Der Meß- und Sortiervorgang läuft halbautomatisch ab und läßt sich in einem Takt von etwa 15 s durchführen

# XV. Elektrische Prüfeinrichtungen

## Isolations-Prüfeinrichtungen

Elektrische Isolierstoffe, Maschinen, Geräte und Anlagen müssen nach VDE-Vorschriften auf ihre Durchschlagsfestigkeit bzw. Isolation geprüft werden, und zwar mit praktisch sinusförmiger Wechselspannung. Dabei ist die Spannung stoßfrei allmählich auf die Höhe der vorgeschriebenen Prüfspannung zu steigern.

**Tragbare Isolations-Prüfeinrichtung für 2,5/5 kV.** Mit dem Stelltransformator (1 in Bild 170) kann die an den Niederspannungswicklungen des Hochspannungs-Prüftransformators (2) liegende Spannung stufenlos gesteigert werden, so daß der an der Hochspannungswicklung angeschlossene Prüfling einer von Null bis zum Höchstwert (2,5 oder 5 kV) anwachsenden Spannung ausgesetzt ist. Mit einem Dreheiseninstrument wird die Hochspannung niederspannungsseitig bei Leerlauf gemessen. Eine Sonderausführung — gestrichelt gezeichnet — ermöglicht es, hochspannungsseitig, also belastungsunabhängig, zu messen. Bei Überlastung, insbesondere, wenn der Prüfling einen Isolationsfehler hat, schaltet sich die Einrichtung selbsttätig ab (über Auslösespule 3). Soll jedoch eine Fehlerstelle durch Ausbrennen kenntlich gemacht werden, so kann durch Kurzschließen von 3 mit der Taste 4 das Abschalten vorübergehend verhindert werden.

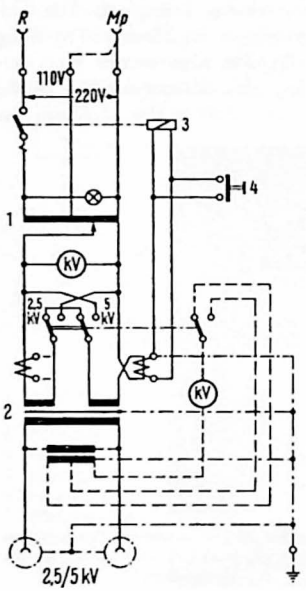



Bild 170
Tragbare Isolations-Prüfeinrichtung für 2,5/5 kV, Grundschaltung.

1 Stelltransformator
2 Hochspannungs-Prüftransformator
3 Auslösespule
4 Ausbrenntaste

**60-kV-Öl- und Isolations-Prüfeinrichtung.** Diese Einrichtung, die ähnlich Bild 170 geschaltet ist, dient vorzugsweise zur Ölprüfung, kann jedoch ebenfalls zum Prüfen der Durchschlagsfestigkeit von festen Isolierstoffen sowie der Isolation von Hochspannungsmaschinen usw. verwendet werden. Um auch bei der Prüfung alter Isolieröle geringerer Durchschlagsfestigkeit eine hohe Anzeigegenauigkeit zu erzielen, läßt sich der Hochspannungs-Prüftransformator auf 30 kV umschalten.

Bei der Ölprüfung arbeitet die Einrichtung nach VDE 0370 mit festem Elektrodenabstand und veränderbarer Prüfspannung. Die Spannung wird so lange stetig erhöht, bis ein Überschlag zwischen den Elektroden des Prüfgefäßes erfolgt. Soll das Öl durch ein Einblickfenster auf Trübung oder Fremdkörper beobachtet werden, so kann das Ölprüfgefäß von unten durchleuchtet werden.

In einer vervollkommneteren Ausführung kann der Stelltransformator nach einer Vorprüfung auf Motorantrieb umgekuppelt werden. Man erzielt dadurch für genaue Messungen einen völlig stetigen Spannungsanstieg von Null bis zum Durchschlag innerhalb der lt. VDE vorgeschriebenen Zeitspanne von 20 s. Zum Prüfen gebrauchter Öle ist eine Spannungsanstiegszeit von 60 s für die Vollspannung einstellbar.

Bei Durchschlag schaltet sich die Einrichtung automatisch ab, doch wird der Zeiger des niederspannungsseitig angeschlossenen Spannungsmessers (Doppelskale 0 bis 60 kV — 0 bis 250 kV/cm) von einer Haltevorrichtung in der erreichten Stellung festgehalten, so daß die Durchschlagsspannung und auch die Durchschlagsfestigkeit sicher abgelesen werden können.

Für Isolationsprüfungen lassen sich die Hochspannungsverbindungen nach hinten herausklappen (Bild 171) und zum Anschluß des hinter dem Prüfgerät aufgestellten Prüflings verwenden.

Bild 171 60-kV-Öl- und Isolations-Prüfeinrichtung, Rückseite.
1 Drehschalter des Stelltransformators
2 Einblickfenster des Ölprüfgefäßes
3 Spannungsmesser
4 Spannungssteller bei Ausführung mit Motorantrieb
5 Hochspannungsverbindung (herausgeklappt)

## Kabel-Prüfeinrichtungen

Isolationsprüfungen an Kabeln werden mit Gleichspannung ausgeführt, weil für eine derartige Prüfung mit Wechselspannung ein Prüftransformator sehr großer Leistung zur Deckung des Blindleistungsverbrauchs erforderlich wäre. Bei Gleichspannung hat der Transformator nach Aufladung des Kabels nur noch die durch Isolationsströme verursachten Verluste zu decken. Darüber hinaus kann der Isolationsstrom gemessen und aus seiner Unveränderlichkeit auf die weitere Verwendbarkeit des Kabels geschlossen werden.
Da hohe Fehler-Übergangswiderstände die Fehlerortung erschweren, macht man sie durch „Ausbrennen" niedrig.

**Transportable 40-kV-Kabel-Prüfeinrichtung.** Zur Prüfung von Kabeln mit Betriebsspannungen bis 10 kV verwendet man die transportable 40-kV-Kabel-Prüfeinrichtung. Ihr Hochspannungs-Prüftransformator ist zusammen mit den Hochspannungs-Trockengleichrichtern in einem gesonderten ölgefüllten Gehäuse untergebracht, während der Stelltransformator, ein Anpassungstransformator für das Ausbrennen sowie alle Überwachungs- und Schutzeinrichtungen in einer Bedienungseinrichtung zusammengefaßt sind. Die Einrichtung hat zwei Strommeßbereiche: Bei der Isolationsmessung verwendet man zunächst den Bereich 2 mA und schaltet erst dann auf den Bereich 200 mA um, wenn sich hohe Isolationsströme ergeben oder Ausbrennströme gemessen werden sollen. Der Anpassungstransformator setzt beim Ausbrennen die Leerlaufspannungen im gleichen Verhältnis herab, in dem sich infolge des abnehmenden Fehler-Übergangswiderstandes die Ausbrennströme vergrößern. Dadurch wird die gegebene Leistung des Stelltransformators auch beim Ausbrennen nicht überschritten. Die Einrichtung wird vorteilhaft in Verbindung mit der Hochspannungs-Kabelmeßbrücke (s. S. 215) benutzt.

**Kabel-Ausbrenngerät.** Vor dem Einleiten des Brennvorganges an einem fehlerhaften Kabel schließt man nach Anlegen einer Prüfgleichspannung (einstellbar von 0 bis 20 und 0 bis 40 kV) aus dem gemessenen Prüfstrom auf die Art und Größe des Fehler-Übergangswiderstandes. Sodann schaltet man auf „Brennen" um, wodurch der Fehler-Übergangswiderstand in wenigen Minuten unter Erzeugen einer gut leitenden, beständigen Kohlebrücke automatisch bis auf weniger als 0,1 Ω verringert werden kann.
Alle Schaltzustände des Brenngerätes, wie das Umschalten von „Prüfen" auf „Brennen" und das für den unterbrechungslosen Ablauf des Brennvorgangs erforderliche rasche Umschalten auf niedrigere Spannungen

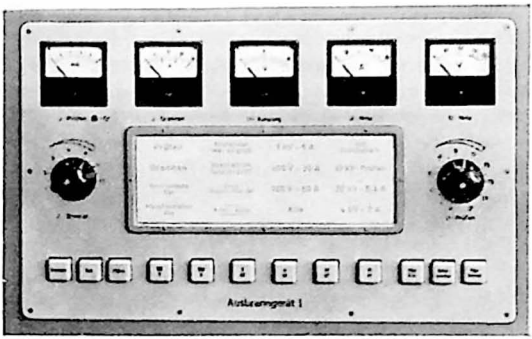


Bild 172 Kabel-Ausbrenngerät, Frontplatte

(entsprechend den aufeinander folgenden Brenn-Phasen, vom anfänglichen Gleitfunken an der Fehlerstelle über die Bildung des Spannungsbogens und des Lichtbogens bis zum Entstehen der Kohlebrücke) werden über Drucktasten ausgelöst, automatisch gesteuert und einschließlich ihrer Auswirkungen – z. B. Abschalten bei Überlastung – auf einer Leuchttafel (s. Bild 172) gemeldet. In der Endphase, während des „Züchtens" der Kohlebrücke, die eine beständige Temperatur von etwa 800°C an der Fehlerstelle erfordert, arbeitet die Einrichtung zum Konstanthalten des Strom-Spannungs-Verhältnisses vollautomatisch.

Zum Anschließen des Prüflings dient ein besonderes Anschaltgerät, das eine elektrische Weiche enthält, die jede vom Prüfling kommende Hochspannung, auch steile Wanderwellen, sperrt, aber die Wirkungsweise des Gerätes nicht beeinträchtigt.

In Verbindung mit einem Zusatzgerät, dem 125-kV-Hochspannungszusatz (Bild 173 ohne Steuergerät), kann man Prüfgleichspannungen bis 125 kV erzeugen und mit dem Ausbrenngerät steuern und überwachen. Auch eine Wechselspannungserzeugung bis 90 kV läßt sich nach Umschalten des Hochspannungserzeugers am Brenngerät einstellen. Je 20 m lange Kabel stellen die Verbindung zwischen dem Ausbrenngerät und dem Spannungserzeuger (Hochspannungstransformator) sowie dem Meßwiderstand des Hochspannungszusatzes her. Die im Ausbrenngerät eingebauten Schutzeinrichtungen sind jetzt für die Gesamteinrichtung wirksam.

**Hochspannungsprüfeinrichtung 125 kV.** Tritt an die Stelle des Ausbrenngerätes (ums.) ein spezielles Steuergerät mit Drucktasten, Leuchttableau, Schutzeinrichtungen und Anzeigeinstrumenten zur Bedienung des Hochspannungstransformators, dann kann der Hochspannungszusatz als selbständige Hochspannungsprüfeinrichtung verwendet werden.

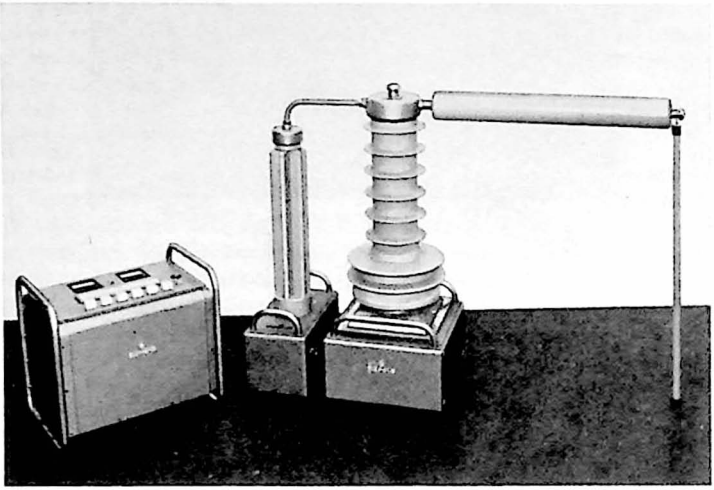


Bild 173 Hochspannungsprüfeinrichtung 125 kV, bestehend aus Steuergerät, Meßwiderstand, Hochspannungstransformator und Schutzwiderstand

**Impulslaufzeit-Meßgerät.** Fehlerortungen an Kabeln und Freileitungen können sowohl mit Kabelmeßbrücken (s. S. 210 bis 215) als auch einfacher und schneller mit Impulsreflexions-Verfahren durchgeführt werden. Vom Prüfgerät ausgehende, in Zeitfolge und Form genau definierte Impulse rufen an Stellen abweichenden Wellenwiderstandes, also an Fehlerstellen (Isolationsfehler und Aderbrüche), Muffen, Masten usw. rücklaufende Reflexionsspannungen hervor, die ihrer Herkunft nach deutlich durch Vorzeichen und Amplitude zu unterscheiden sind. Wenn die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Impulse für eine Leitung bekannt ist, die ja nur von der Dielektrizitätskonstante beeinflußt wird, dann sind die Laufzeiten des Impulses und der rücklaufenden Reflexionsspannungen ein Maß für die Entfernung der Reflexionsstellen von der Meßstelle.

**GEOSKOP.** Schnell und auf den Punkt genau kann man mit diesem induktiven Suchgerät niederohmige Kabelfehler orten. Das Gerät arbeitet nach einem direkten Suchverfahren, bei dem Trasse und Fehlerort durch Messen des Magnetfeldes in der Umgebung des stromführenden Kabels gefunden werden. Je nach Art des Kabels und des vermuteten Fehlers werden ein tonfrequenter Strom oder hochfrequente Impulse in das Kabel gespeist. Danach kann die Trasse mit dem hochselektiven Empfangsgerät, das intensitätsabhängige akustische Impulsfolgen abgibt, „akustisch" verfolgt werden. Sprunghafte Änderungen der Intensität des empfangenen Feldes lassen Fehlerstellen direkt erkennen. Infolgedessen können Störungen außerordentlich schnell aufgefunden und Erdarbeiten zur Störungsbeseitigung gleich an der richtigen Stelle begonnen werden.

Das Suchgerät GEOSKOP ist einem vielseitigen Aufgabenbereich entsprechend aufgeteilt:

1. Grundausrüstung, bestehend aus: TE-Sender und TF-Empfänger zum Verfolgen der Trasse fehlerfreier oder fehlerhafter Kabel und zum Aufsuchen von Isolationsfehlern (Drallfeldverfahren). Diese Einrichtung reicht aus, um den größten Teil der Kabelfehler sicher und genau zu orten.
2. HF-Zusatz zur Grundausrüstung, bestehend aus: HF-Sender und HF-Empfänger zum Orten einadriger Erdschlüsse, die sich nicht in mehradrige umwandeln lassen (HF-Impulsverfahren).
3. Abhörzusatz zur Grundausrüstung, bestehend aus: zwei Geophonen und einem Symmetrieverstärker zum Bestimmen von Fehlerstellen, die nicht ausbrennbar sind (Schallfeldverfahren).

Die Vielseitigkeit des GEOSKOP und seine Unabhängigkeit von Kabeldaten kommen besonders dann zur Geltung, wenn durch eine Vorortung, z.B. mit einem Impulslaufzeit-Meßgerät, die Fehlerstelle so weit eingegrenzt ist, daß das Abschreiten der Kabeltrasse auf wenige Meter beschränkt bleibt.

## Relais-Prüfeinrichtungen

Relais zum Schutz von Apparaten und Anlagen müssen stets betriebsbereit sein, auch nach langen Ruhepausen. Es sind deshalb Einrichtungen geschaffen worden, mit denen die Relais unmittelbar an ihrem Einbauort überprüft werden können.

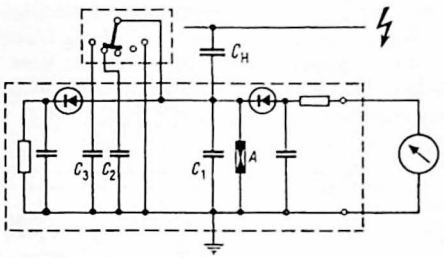
**Hochstrom-Relais-Prüfeinrichtung.** Die Einrichtung ermöglicht es, alle zum Prüfen und Einstellen von Überstromrelais und Primärauslösern benötigten Spannungen und Ströme von 0 bis 295 V und von 0 bis 2000 A stufenlos und unterbrechungsfrei einzustellen. Zum leichten Transportieren ist sie in zwei Einheiten unterteilt: Das Grundgerät enthält einen Stelltransformator (induktiver Ringkernregler), alle Schalt- und Stellorgane und einen direkt oder über eingebaute Stromwandler einzuschaltenden Strommesser, das Zusatzgerät einen Hochstrom-Transformator zum Einstellen aller Ströme über 25 A (im Dauerbetrieb) oder über 100 A (im Kurzbetrieb, 3 min). Der Hochstrom-Transformator hat vier Wicklungen, die je nach Bedarf an Laschenumschaltern parallel, in Reihe oder reihenparallel geschaltet werden können. Zum Überwachen der Schaltzeiten von Relais sowie zum Einmessen von Zeitrelais dient ein außen anzuschließender elektrischer Sekundenmesser mit Synchronmotor, rückstellbarem Zählwerk und elektrischem Kuppelrelais. Er hat einen Meßbereich von 0 bis 20 s (großer Zeiger für 1 s und kleiner für 20 s Umlaufzeit) und kann zum Prüfen der Schaltzeiten von Relais sowohl mit Ruhe- als auch mit Arbeitskontakt verwendet werden.

**Tragbare Prüfeinrichtung für Sekundärrelais.** Mit der tragbaren Prüfeinrichtung kann man alle Arten Sekundärrelais prüfen, ohne sie ausbauen oder abtrennen zu müssen. Die zu prüfenden Kreise erhalten dazu von vornherein Steckerhülsen, in die die Stecker der Prüfleitungen einzuführen sind. Beim Anschließen der Prüfleitungen wird die Auslöseleitung selbsttätig abgetrennt, so daß Fehlauslösungen während der Prüfung ausgeschlossen sind.

## Scheitelspannungs-Meßeinrichtung

Maßgebende Größe bei Hochspannungsprüfungen an elektrischen Maschinen, Transformatoren und Wandlern ist die Scheitelspannung. Als Prüfspannungen gelten die den Effektivwerten bei reiner Sinusform entsprechenden Scheitelspannungen.

Bild 174 zeigt die Grundschaltung der Scheitelspannungs-Meßeinrichtung. Das Meßprinzip beruht auf einer kapazitiven Spannungsteilung am Hochspannungs-Meßkondensator $C_H$ und an den in das Gerät eingebauten Niederspannungs-Kondensator-Gruppen $C_1$, $C_2$, $C_3$, die je nach Meßbereich für die Spannungsverhältnisse 1:2:4 zusammenzuschalten sind. Die Teilspannungen werden gleichgerichtet und von einem Lichtmarken-Galvanometer angezeigt. Zum Schutz gegen Überspannung ist ein Spannungsableiter $A$ eingebaut.




$C_H$ Hochspannungs-Meßkondensator
$C_1, C_2, C_3$ Niederspannungs-Kondensator-Gruppen
$A$ Spannungsableiter

Bild 174 Scheitelspannungs-Meßeinrichtung, Grundschaltung

Das Lichtmarken-Galvanometer zeigt an und für sich Scheitelwerte an, seine Skale ist jedoch in kV/$\sqrt{2}$-Werte geteilt. Der abgelesene Wert entspricht demnach dem Effektivwert einer rein sinusförmigen Spannung, die denselben Scheitelwert wie die gemessenene Prüfspannung hat. Der höchste Meßbereich ist gleich der Nennspannung des verwendeten Hochspannungs-Meßkondensators ($U_{\text{eff}}$ zwischen 30 und 300 kV). Anzeigetoleranz: $\pm 1\%$ für eine bestimmte Frequenz im Bereich 50 bis 300 Hz.

## Meßwandler-Prüfeinrichtungen

Zur Prüfung von Wandlern gibt es neben der vorerwähnten Scheitelspannungs-Meßeinrichtung für die Hochspannungsprüfung folgende Einrichtungen:

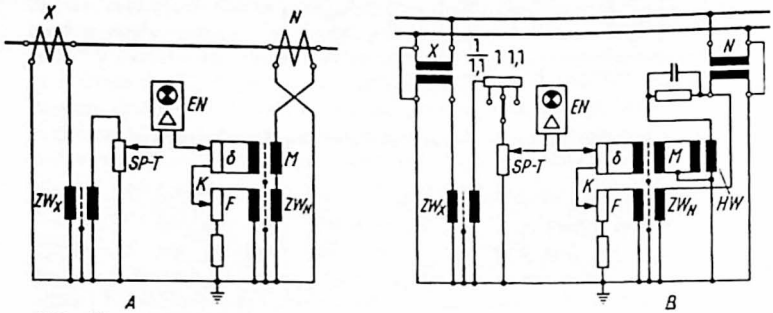
Übersetzungsmesser zum Messen des Übersetzungsverhältnisses,

Einrichtungen zum Messen des Strom- und Spannungsfehlers und des Fehlwinkels sowie zum Bestimmen von Bürden,

*n*-Meßeinrichtung zum Messen der Nennüberstromziffer *n*.

**Wandler- und Bürdenmeßeinrichtung nach dem Kompensationsverfahren.** Bild 175 *A* zeigt die Schaltung für die Stromwandlerprüfung. Der Prüfling *X* und der Normalwandler *N* liegen primärseitig in Reihe. Sekundärseitig speist *X* den Zwischenwandler $ZW_X$, an dessen Sekundärseite ein Spannungsteiler *Sp-T* angeschlossen ist, und *N* über die Gegeninduktivität *M* und den Zwischenwandler $ZW_N$ den komplexen Kompensator *K* (vgl. S. 223). Während am Schleifdraht *F* eine $I_N$ proportionale und phasengleiche Spannung abgegriffen wird, gibt der Schleifdraht $\delta$

eine zwar auch $I_N$ proportionale, aber um 90° phasenverschobene Spannung ab. Mit der Summe beider Spannungen wird die am *Sp-T* abgegriffene Spannung über den elektronischen Nullindikator *EN* (s. S. 149) kompensiert. An der Teilung der Schleifdrähte kann der Stromfehler $F_i$ in % und der Fehlwinkel $\delta_i$ in min abgelesen werden.




*X* Prüfling
*N* Normalwandler
$ZW_X$, $ZW_N$ Zwischenwandler
*Sp-T* Spannungsteiler
*M* Gegeninduktivität
*HW* Hilfswandler
*K* komplexer Kompensator
*F* Schleifdraht zur Strom- bzw. Spannungsfehlerkompensation
δ Schleifdraht zur Fehlwinkelkompensation
*EN* Elektronischer Nullindikator

Bild 175 Wandler- und Bürdenmeßeinrichtung nach dem Kompensationsverfahren. *A* Grundschaltung beim Messen von Stromwandlern, *B* Grundschaltung beim Messen von Spannungswandlern

Zur Spannungswandlerprüfung (Bild 175 *B*) werden die Primär- und Sekundärwicklungen der Zwischenwandler miteinander vertauscht; *M* wird über den Hilfswandler *HW* mit seinen vorgeschalteten Abgleichgliedern gespeist. Ein Zusatzwiderstand zur Einstellung auf den 1,1-, 1- und 1/1,1fachen Spannungswert ermöglicht Messungen an Prüflingen für sekundär 110 V (bzw. $110/\sqrt{3}$ V) mit einem Normalwandler für sekundär 100 V (bzw. $100/\sqrt{3}$ V) und umgekehrt. Auch hier geben nach der Kompensation die Einstellungen der Schleifdrähte die Fehler an: Spannungsfehler $F_u$ und Fehlwinkel $\delta_u$.

Da sich mit *Sp-T* Werte zwischen 50 und 100% des Normalwandlers einstellen lassen, können Wandler geprüft werden, deren Übersetzungsverhältnis 50 bis 110% von dem des Normalwandlers beträgt.

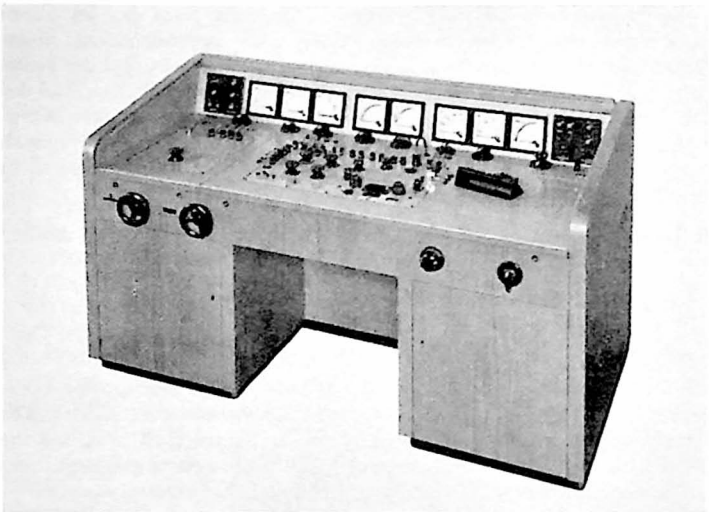


Bild 176 Meßwandler-Prüftisch mit Wandler- und Bürdenmeßeinrichtung nach dem Kompensationsverfahren und Scheitelspannungs-Meßeinrichtung

Strom- und Spannungswandler-Bürden werden durch Messen der Wirk- und Blindkomponenten mit dem komplexen Kompensator bestimmt. Die Wirkkomponente ist an der $F$-, die Blindkomponente an der $\delta$-Skale abzulesen. Aus Hilfstafeln lassen sich dann der Leistungsfaktor $\cos\beta$ sowie von Stromwandlerbürden der Scheinwiderstand $Z_n$ in $\Omega$ und die Nennscheinleistung $(Z_n \cdot I_{2n}^2)$ in VA und von Spannungswandlerbürden der Scheinleitwert $Y_n$ in S entnehmen. Die Nennscheinleistung von Spannungswandlerbürden ermittelt man aus $Y_n \cdot U_{2n}^2$ in VA (vgl. S. 178).

Für Prüffelder der Industrie und Eichämter werden meist mehrere der verschiedenen Meßwandler-Prüfeinrichtungen in Meßwandler-Prüftischen mit allen für die Einstellung und Überwachung der Prüfströme und Prüfspannungen erforderlichen Geräten vereinigt (Bild 176).

**Tragbare Meßwandler-Prüfeinrichtung** nach Dr. Hohle. Die Differenz zwischen den Sekundärströmen oder -spannungen des Prüflings und eines Normalwandlers mit gleichem Übersetzungsverhältnis wird nach der Null-

methode gemessen. Bei der Stromwandlerprüfung wird der an einem Widerstand vom Differenzstrom (Fehlerstrom) hervorgerufene Spannungsabfall mit einem komplexen Kompensator gemessen, bei der Spannungswandlerprüfung der an einem Spannungsteiler abgegriffene Teil der Differenzspannung. Da gegenüber der Meßeinrichtung nach dem Kompensationsverfahren keine Zwischenwandler verwendet werden, müssen hier $X$ und $N$ gleiche Übersetzungsverhältnisse haben, d.h., $N$ muß in den Meßbereichen feiner unterteilt sein.

***n*-Meßeinrichtung.** Der Einrichtung liegt, um nicht mit zu großen Strömen arbeiten zu müssen, das praktisch für alle Stromwandler anwendbare Leerlaufverfahren nach VDE 0414 zugrunde.

## Zähler-Prüfeinrichtungen

Zähler-Prüfeinrichtungen dienen zum wirtschaftlichen Nachprüfen überholter Elektrizitätszähler und zum Überprüfen fabrikneuer Zähler. Die Einrichtungen enthalten alle Bauelemente, die erforderlich sind, um die Zähler bei beliebig einzustellenden Leistungen und Leistungsfaktoren mit den vorgeschriebenen Strömen und Spannungen belasten zu können.

**Wechselstromzähler-Prüfeinrichtungen.** Sie sind meist so ausgelegt, daß größere Serien von Zählern gleichzeitig geprüft werden können. Bild 177 zeigt eine Einrichtung, die in einem Pult von etwa Schreibtischgröße eingebaut ist; an dem fahrbaren Aufhängegestell sind 2 × 20 Zähler aufgehängt. Wenn die 20 Zähler der Vorderseite geprüft sind, wird das Gestell um 180° gedreht, so daß der Prüfer immer 20 Zähler als Arbeitsvorrat hat. Die Prüfung der Zähler kann nach allen gebräuchlichen Methoden erfolgen:

a) mit Wattmetern und Stoppuhr
b) mit einem Gleichlastprüfzähler
c) mit lichtelektrischer Umlaufzählung
d) mit einer stroboskopischen Methode
e) in Synchronprüfung nach einem Normalzähler
f) in Dauerprüfung durch Vergleich der Zählwerksangaben mit denen eines Normalzählers

**Drehstromzähler-Prüfeinrichtung.** Sie enthalten alle Bauelemente in dreifacher Ausführung, d.h. sie haben einen dreiphasigen Strom- und einen dreiphasigen Spannungskreis. Die Ausführung einer solchen Prüfein-

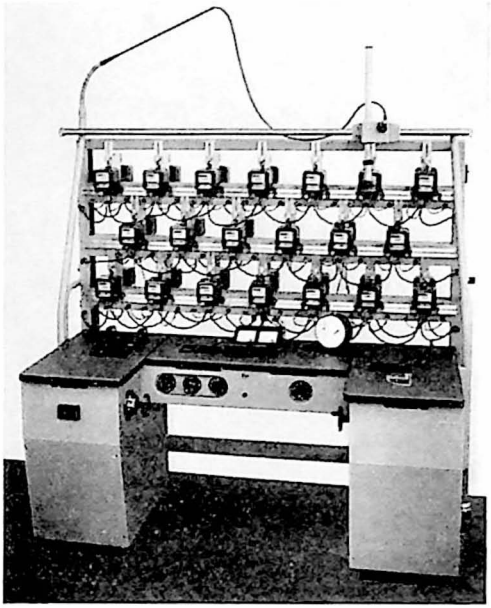


Bild 177
Wechselstromzähler-Prüfeinrichtung für 2 × 20 Zähler mit lichtelektrischem Abtastkopf

richtung ist aus dem Bild 178 ersichtlich. Sämtliche Bedienungselemente sind in unmittelbarer Reichweite des Prüfers angeordnet.

Eine eingebaute *Stromsymmetrierung* gibt die Möglichkeit, in jeder Phase genau die gleiche Verschiebung zwischen Strom und Spannung einzustellen.

Das symmetrische Spannungsdreieck kann mit Hilfe eines Zusatzgerätes, des *Spannungs-Symmetrieanzeigers*, eingestellt werden, so daß die Spannungen R—S, S—T und T—R mit einer Genauigkeit von $1^0/_{00}$ übereinstimmen, ebenso aber auch die Spannungen R—0, S—0 und T—0.

Eine besondere *Nullpunktsymmetrierung* ermöglicht es, den Nullpunkt des Spannungskreises genau in den Schwerpunkt des symmetrischen Spannungsdreieckes zu legen. Das symmetrische Spannungsdreieck und die Nullsymmetrierung sind notwendige Bedingungen für die richtige Prüfung von Blindverbrauchszählern.

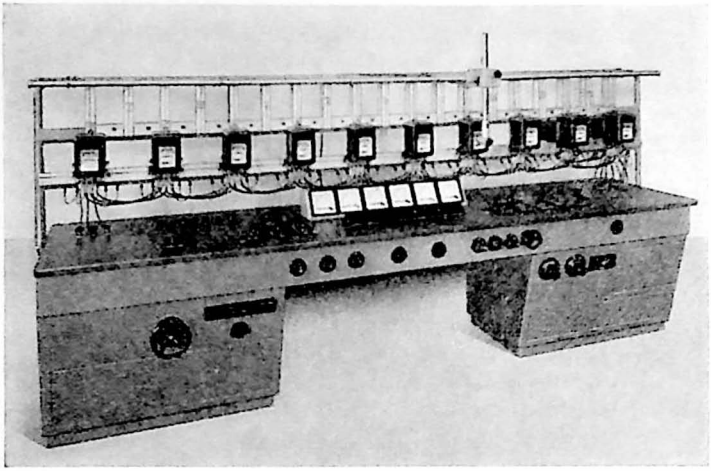


Bild 178 Drehstromzähler-Prüfeinrichtung in moderner Stahlpultform

Das beim Prüfen im allgemeinen erforderliche Zählen der Ankerumdrehungen kann dem Prüfer von einem *lichtelektrischen Zählgerät* abgenommen werden. Dieses Gerät zählt bis 249 Umdrehungen der Zählerscheibe und kann nach Ablauf einer im voraus einstellbaren Umdrehungszahl eine bestimmte Funktion ausführen, z.B.: Stoppuhr, Prüfzähler oder Prüfeinrichtung ein- und ausschalten. Gleichzeitig kann man mit diesem lichtelektrischen Zählgerät die Zähler *stroboskopisch einstellen und prüfen*. Die Prüflinge und der Normalzähler müssen dazu am Rand ihrer Zählerscheiben eine 400er-Teilung besitzen. Die Teilung am Normalzähler wird ausgenutzt, um eine Stroboskoplampe im Beobachtungskopf entsprechend zu zünden. Bei Übereinstimmung der Zählerscheiben-Drehzahlen des Normalzählers und eines Prüflings scheinen die Zählerscheiben stillzustehen.

Zur Schlußprüfung werden die geeichten Zähler meist einer *Dauerprüfung* unterzogen, und zwar 100, 200 oder 300 Zähler gleichzeitig. Dabei müssen die Zählwerkanzeigen der Prüflinge mit der Anzeige eines Präzisions-Normalzählers übereinstimmen. Bild 179 zeigt eine Dauerprüfeinrichtung für 200 Drehstromzähler. Zur Einrichtung im engeren Sinne gehört nur

ein Bedienungspult; denn die Zähler sind an gesonderten fahrbaren oder festen Gestellen aufgehängt.

Für die *Prüfung von Spezialzählern* mit sehr kleinen Nennströmen können in die Zähler-Prüfeinrichtungen Zwischenwandler eingebaut werden, so daß die eingebauten Leistungsmesser bei jedem Prüfpunkt von 10 mA bis 100 A Vollausschlag zeigen.

Für die Zählereichung werden schließlich benötigt: Konstanthalteeinrichtungen, Eichumformer, Kompensator-Meßtische (s. S. 142) mit Kaskaden- oder Stufenkompensatoren sowie Gleichlast-Prüfzähler und Arbeitswaagen.

Eine Spannungskonstanthalteeinrichtung in normaler Ausführung für eine Ausgangsleistung von 3 kVA hält die Ausgangsdrehstromspannung auf $\pm 0{,}05\%$ konstant. Sie besteht aus einem Drehstromumformer mit Synchronantrieb, aus einer Bedienungstafel und aus dem zugehörigen Regler.

Eine größere Ausführung besitzt statt eines Drehstromgenerators drei Einphasengeneratoren für je drei kVA, die im Dreieck geschaltet sind. Diese Einrichtung kann eine Drehstromleistung von 9 kVA bei einer Spannungskonstanz von $\pm 0{,}05\%$ abgeben, wobei aber die Spannung in jeder Phase konstantgehalten wird.

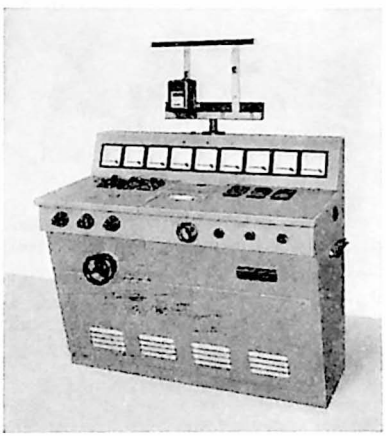


Bild 179
Bedienungspult einer Dauerprüfeinrichtung für 200 Drehstromzähler

# XVI. Elektronenmikroskopie

Die Leistungsfähigkeit des *Lichtmikroskops* ist durch die Wellenlänge $\lambda$ des zur Abbildung benutzten Lichtes begrenzt. Objekteinzelheiten, deren Abstand voneinander kleiner als diese Wellenlänge ist, lassen sich nicht trennen, da in diesem Falle die Beugung des Lichtes und Interferenzerscheinungen stören.

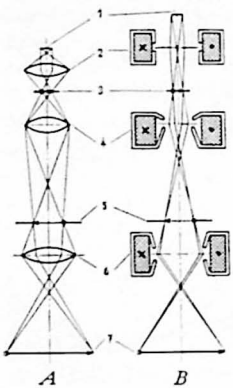
Die durch die Wellenlänge gesetzte Schranke läßt sich aber hinausschieben, wenn man zur Abbildung freie Elektronen verwendet; sie sind im magnetischen und elektrischen Feld ablenkbar. Durch

$$\lambda = \frac{h}{m\,v}$$

$\lambda$ Wellenlänge
$h$ Planck'sches Wirkungsquantum
$m$ Masse
$v$ Geschwindigkeit

sind *Wellenstrahlung* und *Korpuskularstrahlung* miteinander verknüpft, so daß den Elektronenstrahlen eine Wellenlänge zugeordnet werden kann, die um fünf Zehnerpotenzen kürzer ist als die Lichtwellenlänge. Die Auflösungsverbesserung ist jedoch wegen nicht korrigierbarer Fehler elektronenoptischer Linsen auf drei Zehnerpotenzen beschränkt.

Von den verschiedenen elektronenoptischen Abbildungsverfahren hat die Durchstrahlung von Objekten mit anschließender Abbildung durch vergrößernde magnetische Linsen die größte praktische Bedeutung erlangt. Bild 180 zeigt die Gegenüberstellung der Strahlengänge im Lichtmikroskop und im „*magnetischen*" *Durchstrahlungs-Elektronenmikroskop.*




1 Lichtquelle bzw. Elektronenquelle
2 Kondensor
3 Objekt
4 Objektiv
5 Zwischenbild
6 Projektionslinse
7 Endbild

Bild 180 Strahlengang des Lichtmikroskops (*A*) und des „magnetischen" Durchstrahlungs-Elektronenmikroskops (*B*)

Beim Siemens-Elektronenmikroskop ELMISKOP I (Bild 181) dient als Elektronenquelle eine haarnadelförmige Wolfram-Glühkathode (2) (vgl. Bild 182). Die austretenden Elektronen werden von einer Steuerblende (3) gut gebündelt und auf dem Weg zur durchbohrten Anode (4) beschleunigt. (Die Beschleunigungsspannung kann während des Betriebes auf 40, 60, 80 oder 100 kV eingestellt werden. Die niederfrequent erzeugten und elektronisch stabilisierten Spannungen haben eine außerordentlich hohe Konstanz; z. B. werden die 100 kV auf $\pm$ 2 V — bezogen auf eine Zeitdauer von 1 min — konstantgehalten. Der Strahlstrom läßt sich auf max. 60 $\mu$A einstellen.)

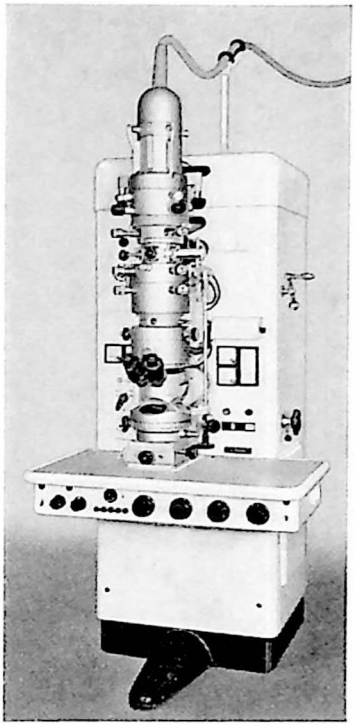
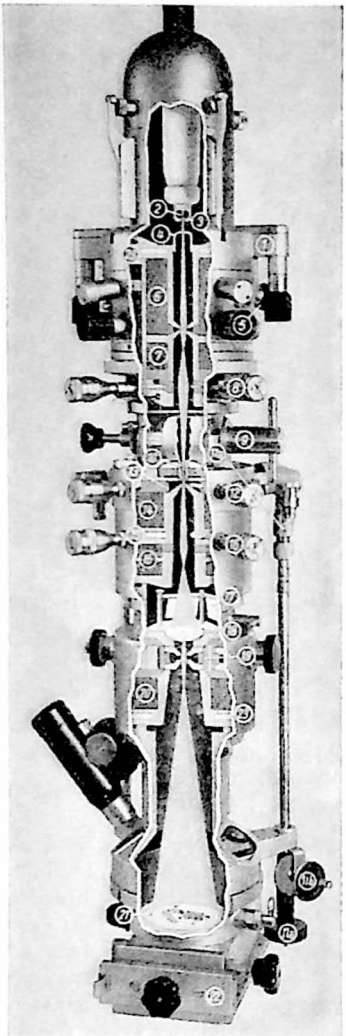


Bild 181 Siemens-Elektronenmikroskop ELMISKOP I

Zwei unabhängig voneinander regelbare magnetische Kondensorlinsen (6 und 7) variabler Brennweite ermöglichen es, die Beleuchtung des Objekts den jeweils vorliegenden Problemen anzupassen. Mit der Linse (6), die eine zentriert eingesetzte Aperturblende hat, läßt sich der engste Strahlquerschnitt, der durch die fokussierende Wirkung von Kathode (2) und Steuerblende (3) hervorgerufen wird, noch auf 1/50 verkleinern. Die Linse (7) bildet den verkleinerten Strahlquerschnitt 1:2 vergrößert auf dem Objekt in der Objektpatrone (10) ab. (7) hat einen Schieber (8) für drei verschieden große Aperturblenden, mit deren Hilfe sich während des Betriebs die Bestrahlungsapertur stufenweise ändern läßt. Bei einer Feinstrahlbeleuchtung werden kleinste Teilbereiche des Objekts bis hinab zu etwa 2 $\mu$m Durchmesser durchstrahlt. Um den feinbestrahlten Objekt-



bereich in punktförmiger (stigmatischer) Form zu erhalten, ist ein einfacher magnetischer Stigmator eingebaut.

Die auf Blenden oder Netzen präparierten elektronenmikroskopischen Präparate werden außerhalb des Mikroskops in eine Objektpatrone (10) eingesetzt, die dann über eine Schleuse (9) in den zwischen Kondensor und Objektiv angeordneten Objekttisch (11a) der Mikroskopröhre und damit in eine

1 Stelltriebe zum Justieren der Strahlquelle
2 Glühkathode
3 Steuerblende
4 Anode
5 Schwenk- und Verschiebungstriebe
6 Kondensor 1
7 Kondensor 2
8 Kondensorblendentrieb
9 Schleuse
10 Objektpatrone
11a Objekttisch und Feinverstellung
11b Schnelltrieb
12 Objektivblendentrieb
13 Sitz des Stigmators
14 Objektiv
15 Zwischenlinse
16 Zwischenlinsenblendentrieb
17 Zwischenbildspiegel
18 Zwischenbildschirm
19 Polschuhrevolver und Triebe
20 Projektiv
21 Endbildleuchtschirm
22 Aufnahmekassette
23 Wasserkühlung

Bild 182 Mikroskopröhre des ELMISKOP I

definierte Lage zum Elektronenstrahl gebracht wird. Zum Durchmustern des Objektbereiches läßt sich der Tisch in zwei zueinander senkrechten Richtungen von der Mittellage aus horizontal um $\pm$ 0,8 mm bewegen.

Das dreistufige Abbildungslinsensystem besteht aus Objektiv (14), Zwischenlinse (15) und Projektiv (20). Mit diesem Linsensystem und auswechselbaren Projektivpolschuhen lassen sich 10 feste elektronenoptische Normvergrößerungsstufen von 200 bis 160000fach einstellen. Damit ist auch der lichtmikroskopische Vergrößerungsbereich berücksichtigt. Die oberhalb 1000facher Vergrößerung kontinuierlich überstreichbaren Vergrößerungsbereiche werden von einem entsprechend kalibrierten Instrument angezeigt.

Objektiv (14) und Zwischenlinse (15) bilden konstruktiv eine Einheit, die aus zwei eisengekapselten, wassergekühlten (23) Magnetspulen besteht, und deren Zentralbohrung das Polschuhsystem enthält. Das Objektiv ist wie der Kondensor mit einem magnetischen Stigmator versehen, mit dem die astigmatische Brennweitendifferenz bis unter 1 $\mu$m reduziert werden kann.

Die Zwischenlinse (15) kann auch unabhängig vom Objektiv erregt werden. Damit läßt sich z. B. die hintere Brennebene des Objektivs in der Gegenstandsebene des Projektivs abbilden, wie es zum Erzeugen von Beugungsdiagrammen kleinster Objektbereiche auf dem Endbildleuchtschirm (21) nötig ist.

Der Endbildleuchtschirm kann durch drei große Fenster mit einer etwa 9fach vergrößernden Binokularlupe betrachtet werden. Das Gesichtsfeld der Lupe hat einen Durchmesser von etwa 25 mm.

Zur fotografischen Aufnahme der elektronenmikroskopischen Bilder ist das ELMISKOP I mit einer Reihenaufnahmekassette (22) für 12 Fotoplatten vom Format 6,5 cm $\times$ 9 cm ausgerüstet. Es läßt sich aber auch eine Filmkassette für 70-mm-Rollfilm einsetzen. Mit einer Kassettenfüllung können bis zu 40 Aufnahmen gemacht werden.

Zum Erzeugen des in der Mikroskopröhre notwendigen Vakuums wirken drei Pumpen zusammen. Eine einstufige rotierende Gasballastpumpe mit einer Saugleistung von 6 m³/h erzeugt in etwa 1,5 min das Vorvakuum für die beiden dreistufigen und wassergekühlten Hochvakuumpumpen (eine Quecksilberdampfstrahlpumpe und eine Öldiffusionspumpe). Die Saugleistung der Quecksilberdampfstrahlpumpe beträgt 12 l/s bei $10^{-2}$ Torr, die der Öldiffusionspumpe 105 l/s bei $10^{-3}$ Torr. Vorvakuum und Hochvakuum werden gemessen und angezeigt. Der Arbeitsbereich beim Mikroskopieren beträgt etwa $10^{-4}$ Torr.

Strahlspannung und Versorgungsspannung werden aus einem Netzanschlußschrank zugeführt. Dieser enthält außer der Hochspannungsanlage auch die Einrichtungen zum Stabilisieren der Beschleunigungsspannungen und zum Erzeugen der konstanten Linsenströme. Er ist für Netzanschluß 220 V, 50 oder 60 Hz, ausgelegt.

Ohne Umbau oder Belüften der Mikroskopröhre können nacheinander mikroskopische Bilder, stereoskopische Bildpaare und quantitativ auswertbare Durchstrahlungsbeugungsdiagramme der Präparate aufgenommen werden. Die getrennt vom Objektiv regelbare Zwischenlinse und das um $\pm 2°$ kippbare Bestrahlungssystem ermöglichen Feinbereichsbeugung sowie Dunkelfeldmikroskopie.

Für spezielle Anwendungsfälle ist eine Reihe von Zusatzeinrichtungen bestimmt, z. B. zur Objektkühlung, Objektheizung, Objektdehnung, Simultanbeugung, Universalbeugung und Röntgenmikroanalyse.

Die für das ELMISKOP I unter Berücksichtigung der Linsenfehler des Objektivs berechnete theoretische Grenze des Punktauflösungsvermögens liegt bei etwa 3 Å. Werte bis unter 5 Å wurden bereits erzielt. — Bild 183 ist ein Beispiel für eine elektronenoptische Abbildung.

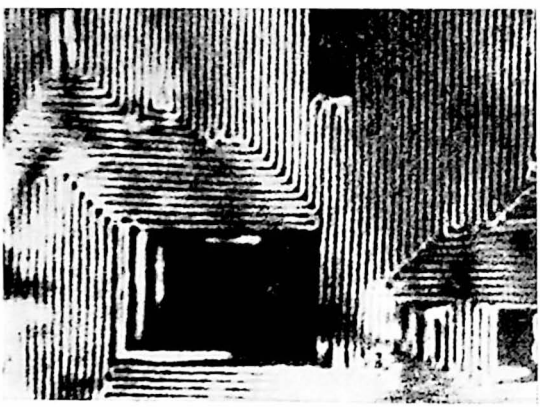


Bild 183
Einkristalline Cu-Al-Schicht; Übergang von Cu-Al I zu Cu-Al II. 440000fache Vergrößerung (88000fach el.-opt. und 5fach fotogr.)

# XVII. Strahlungsmessung

Man bezeichnet die Stoffe als radioaktiv, deren Atomkerne instabil sind. Ihre Kerne zerfallen unter Aussenden von Strahlen und gelangen entweder über einige radioaktive Zwischenstufen oder in einem einzigen Schritt in einen stabilen Endzustand. Die bei solchen Umwandlungsprozessen ausgesandten Strahlen sind von Stoff zu Stoff verschieden. Man unterscheidet eine Emission von *α-Strahlen* (Heliumkerne), *β-Strahlen* (energiereiche Elektronen) und *γ-Strahlen* (Quanten elektromagnetischer Schwingungen hoher Energie).

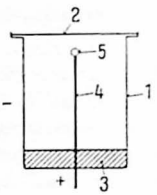
Es gibt natürliche und künstlich erzeugte radioaktive Stoffe. Zu den natürlichen, d.h. in der Natur vorkommenden, gehören beispielsweise Uran, Radium und Thorium; künstliche in Reaktoren oder Teilchenbeschleunigern hergestellte radioaktive Isotope von Elementen sind z.B. Phosphor 32, Kobalt 60 und Jod 131. (*Isotope* eines Elements: Atomarten mit unterschiedlichen Massenzahlen, aber gleichen Kernladungen. Sie stehen im periodischen System unter dem Symbol des Elements und haben gleiche chemische, jedoch verschiedene physikalische Eigenschaften.)

Messungen mit radioaktiven Stoffen werden heute in vielfältiger Art und Weise in der Industrie, der Medizin und der Forschung vorgenommen. Aus der Vielzahl technischer Anwendungen seien nur folgende genannt: Füllstandmessungen an Behältern, Dichtemessungen, Feuchtemessungen, Schichtdickenmessungen und Fehlersuche in Rohrleitungen. Das Schicksal normalerweise inaktiver Substanzen in physikalischen, chemischen und biologischen Systemen wird an ihren radioaktiven Isotopen beobachtet. Ein bekanntes Beispiel aus der Medizin ist die Schilddrüsendiagnostik mit Radiojod, bei der auch das Jodspeichervermögen der Schilddrüse gemessen werden kann. Ebenso bekannt ist die Altersbestimmung organischer Substanzen durch die Messung ihres C 14-Gehaltes. Alle diese Messungen gehören in das Gebiet der *Strahlungsmeßtechnik*: Erfassen der Strahlungen mit entsprechenden Strahlungsdetektoren und Messen mit nachgeschalteten Strahlungsmeßgeräten.

**Strahlungsdetektoren.** Man unterscheidet Zählrohre (Proportionalzählrohre, Auslösezählrohre), Ionisationskammern und Szintillationszähler.

Bei den *Zählrohren* ist in der Achse einer Zylinderkathode eine dünne Drahtanode ausgespannt (Bild 184), so daß ein sehr inhomogenes Feld erzeugt und ein eingedrungenes Elektron immer in Richtung auf die

Anode hin beschleunigt wird. Dabei werden im anodennahen Bereich hoher Feldstärke Ionisationsprozesse ausgelöst. Es entsteht eine „radiale Primärlawine", die so lange energiereiche, ihrerseits in der Umgebung ionisierend wirkende Photonen abstrahlt, bis — im Falle des Geiger-Müller-Zählrohres — der ganze Anodendraht von einer Schlauchentladung umgeben ist. Diese innere Elektronenvervielfachung geschieht dermaßen rasch, daß während ihrer Ausbildung die um drei Größenordnungen trägeren positiven Ionen keine nennenswerte Verschiebung erfahren, sondern um die Anode einen Ionenschlauch bilden, dessen Raumladung die Feldstärke herabsetzt. Es können sich zunächst keine weiteren Lawinen mehr ausbilden. Die Ionen wandern nun verhältnismäßig langsam zur Kathode. Dabei bleibt das Zählrohr gegenüber weiteren Primärionisierungen so lange unempfindlich, bis die Mehrzahl der positiven Ionen neutralisiert ist („Totzeit" des Zählrohres). Weil die beim Neutralisieren der Ionen an der Kathode freiwerdende Energie groß genug wäre, durch Ablösen von Elektronen einen neuen Zählvorgang auszulösen, werden der Grundgasfüllung organische Dämpfe oder Halogene zugesetzt. Das Zählrohr wird auf diese Weise „selbstlöschend" gemacht. — Die während der Ionisierungsvorgänge in die Anode eingetretenen Elektronen bleiben zunächst von der das Feld bildenden Kraft der Ionen gebunden. Erst mit der Ausweitung des Ionenschlauches verringert sich die Kraft, und die Elektronen wandern ab. Ein direktes Messen des Zählrohrstromes ist möglich. Meßtechnisch günstiger ist jedoch die Verstärkung des Spannungsimpulses, der an einem dem Zählrohr vorgeschalteten Arbeitswiderstand auftritt, und das anschließende Zählen der Impulse oder das Messen der Impulsrate. Das Meßergebnis ist also eine Impulszahl. Im Gegensatz zu dem bei direkter Strommessung gewonnenen ist es in einem weiten Bereich unabhängig von der Betriebsspannung des Zählrohres.




1 Metallmantel, Kathode
2 Fenster
3 Isolierstopfen
4 Zähldraht, Anode
5 Glasperle

Bild 184
Geiger-Müller-Zählrohr (Glockenzählrohr)

Zu den Zählrohren gehören auch die Methan-Durchflußzähler, in deren Zählraum energiearme Präparate eingebracht werden können („Innenzähler"); man kann auch eine Fensterfolie anbringen, die von der Strahlung durchdrungen werden muß („Außenzähler"). Es ist Proportional- und Auslösebetrieb, bei Betriebsspannungen bis 4000 oder 5000 V, möglich.

In den *Ionisationskammern* herrscht bei einer angelegten Spannung (Innenelektrode an +) zwischen den Elektroden eine annähernd gleichmäßige Feldverteilung, so daß bei Sättigungsspannung alle im Meßvolumen von der Strahlung erzeugten positiven und negativen Ladungsträger auf den Elektroden gesammelt werden.

Aus der Art des Entladungsvorganges ergeben sich die *Verwendungsmöglichkeiten der Ionisationskammern und Zählrohre.* Ist die Betriebsspannung sehr klein, so werden nicht alle von der einfallenden Strahlung erzeugten Ionen von der Kathode abgesaugt, da ein Teil von ihnen wieder neutrale Moleküle bildet („ungesättigter Bereich", Bild 185). Mit steigender Spannung erreicht der Strom aber einen Sättigungswert, der über einige 100 V Spannungsänderung konstant bleibt. In diesem Bereich („gesättigter Bereich") arbeiten Ionisationskammern. Bei weiter erhöhter Spannung entsteht zwar eine Radiallawine, aber Zahl und Energieinhalt der entstehenden Photonen reichen nicht zur Auslösung weiterer Radiallawinen und zur Ausbildung der Schlauchentladung aus. Der Zählrohrimpuls bleibt klein; seine Größe richtet sich nach der Anzahl der Primärionisationen, die wiederum für Art und Energie des auslösenden Quants oder Teilchens kennzeichnend ist. In diesem Bereich („Proportional-Bereich") wird das *Proportionalzählrohr* betrieben, das über die Größe der Impulse Rückschlüsse auf die Art der auslösenden Strahlung ermöglicht. Erst bei noch größerer Arbeitsspannung wird die Schlauchentladung ausgelöst („Auslöse-Bereich"). Da der Endzustand der Schlauchentladung unabhängig von der Erstionisierung ist, werden jetzt alle Impulse gleich groß und lassen keine Aussage über die Natur der auslösenden Strahlung mehr zu. Bei weiterer Steigerung der Arbeitsspannung wächst zwar der Energieinhalt der einzelnen Impulse, aber die Zahl der ausgelösten Impulse nimmt nicht zu. In diesem Bereich arbeiten die *Auslösezählrohre* (*Geiger-Müller-Zählrohre*).

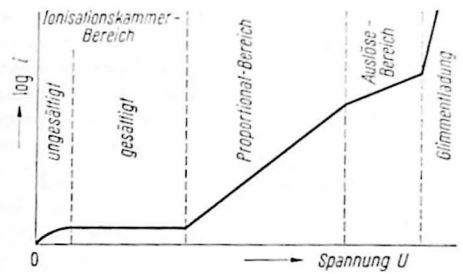



Bild 185
Strom-Spannungs-Abhängigkeit von Zählrohren

Der *Szintillationszähler* (Bild 186) arbeitet nach folgendem Prinzip: Dringt Strahlung in eine Szintillationssubstanz (z. B. NaJ(Tl)-Kristall) ein, so entstehen durch die im Kristall absorbierte Energie kleine Lichtblitze (Szintillationen). — Beta-Strahlung bringt die Atome des Szintillators z.B. in einen „angeregten" Zustand; die Emission des Lichtes erfolgt

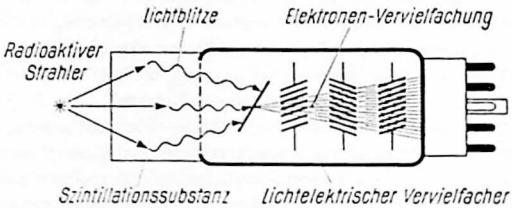



Bild 186
Szintillationszähler

bei der unmittelbar folgenden Rückkehr in den Grundzustand. Gamma-Strahlung setzt im Kristall zuerst Elektronen durch Fotoeffekt, Comptoneffekt oder bei Energien $>1{,}022$ MeV durch Paarbildungseffekt frei, die dann die Szintillation hervorrufen. Für Gamma- und Röntgenstrahlen besteht Proportionalität zwischen aufgenommener und abgegebener Energie, was für spektrometrische Untersuchungen wichtig ist. — Die Lichtblitze gelangen auf die Fotokathode eines Sekundärelektronen-Vervielfachers (Multiplier). Kristall und Fotokathode sind durch Silicon-Öl als Immersionsschicht optisch gekoppelt. Die von der Fotokathode des Vervielfachers (Caesium-Antimon) ausgesandten Elektronen gelangen fortlaufend über mehrere Prallbleche (Dynoden), die aus einem Material mit geringer Austrittsarbeit bestehen, zur Anode. Bei jedem Aufprall werden etwa 3 bis 5 Sekundärelektronen herausgeschlagen. Die Auslösezeit der Sekundärelektronen liegt etwa bei $10^{-10}$ s. Die an der Anode ankommende Elektronenwolke ergibt am Gitter einer galvanisch angekoppelten Kathodenstufe einen entsprechenden Spannungsimpuls, der an der Kathode ausgekoppelt und auf den Verstärker des nachgeschalteten Strahlungsmeßgerätes gegeben wird. — Der Szintillationszähler wird mit negativer Hochspannung bis zu 1500 V betrieben. Das Zählvermögen beträgt $10^6$ Imp./s.

**Strahlungsmeßgeräte.** Die Geräte werden den Strahlungsdetektoren nachgeschaltet und versorgen diese mit der jeweiligen Betriebsspannung (100 bis 5000 V). Das Gerät am *Strahlungsmeßplatz* (Bild 187) ermöglicht Impulszählung mit Zeitvorwahl oder Impulsvorwahl, Mittelwertmessung

1 Impulsspektroskop
2 Elektronische Uhr
3 Impulszähler
4 Mittelwertmesser
5 Anschlußleiste
6 Bleikammer mit oben eingesetztem Szintillationszähler
7 Zählbetrag-Zeit-Drucker
8 Hochspannungserzeuger

Bild 187
Strahlungsmeßplatz in Tischbauweise

und Impulsspektrometrie (Messen der Teilchenenergie) sowie Impulsspektroskopie (Sichtbarmachen des Energiespektrums einer $\gamma$- oder Röntgenstrahlung). Zum Bewältigen dieser Meßaufgaben enthält das Strahlungsmeßgerät einen Hochspannungserzeuger für die Betriebsspannung der Detektoren, einen Linearverstärker für die vom Detektor ankommenden Impulse und zur Speisung des Impulsspektroskops, einen Mittelwertmesser zum Erfassen der Impulsfrequenz, einen Zählteil zur Einzelzählung, einen Zeitmeßteil als Zeitnormal für die Einzelzählung, einen Impulshöhenanalysator (Diskriminator) für die Impulsspektrometrie und ein Impulsspektroskop. Das Bausteinprinzip des Strahlungsmeßgerätes gibt die Möglichkeit, Geräte von der einfachsten bis zur umfassendsten Ausführung aufzubauen. Mit einer Fernbedienung ist das Strahlungsmeßgerät auch aus einer Entfernung von 5 m bedienbar. Über eine Anschlußleiste können Zusatzgeräte, wie ein automatischer Probenwechsler, ein Schreiber oder ein KOMPENSOGRAPH, angeschlossen werden. Sollen der vom Impulszähler angezeigte Zählbetrag und die Zählzeit registriert werden, so ist ein Zählbetrag-Zeit-Drucker an das Strahlungsmeßgerät anzuschließen. Er ermöglicht ein automatisches, kontinuierliches Messen und Drucken. — Eine Bleikammer wird verwendet, um eine definierte

geometrische Anordnung zu haben und den Nulleffekt zu verringern.

Neben dem großen Strahlungsmeßgerät für Labormessungen gibt es für besondere Zwecke auch spezielle Strahlungsmeßgeräte, wie z. B. für Betriebsmessungen und Überwachungsaufgaben den *Strahlenmonitor* (Bild 188). Er ist mit einem Akku ausgestattet und somit netz- und ortsunabhängig. Zum laufenden Betrieb am Netz dient ein im Netzkabel befindliches Ladegerät. Neben Geiger-Müller-Zählrohren und Proportionalzählrohren können auch Szintillationszähler angeschlossen werden.

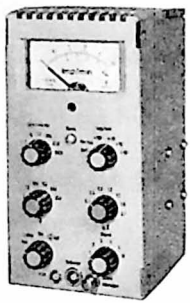


Bild 188 Strahlenmonitor

**Direktsicht-Taschendosimeter.** Die zunehmende Nutzung der Kernenergie machte eine sogenannte Strahlenschutzmeßtechnik notwendig, d. h. eine Strahlenschutzüberwachung von Personen (Individualdosimetrie) und eine Überwachung der Arbeitsplätze (Ortsdosisleistungsmessung) sowie eine Überwachung des Wassers und der Luft. Gesetzlich ist für beruflich strahlenexponierte Personen eine Maximaldosis festgelegt, die nicht überschritten werden darf. Zur Dosismessung bedient man sich verschiedener Indikatoren, die entweder auf fotografischer Basis oder auf dem Prinzip der Ionisationskammer beruhen. Sehr handlich ist das Direktsicht-Taschendosimeter, bei dem sich ein Elektrometerfaden in einer Ionisationskammer befindet. Das Dosimeter wird von einem Ladegerät aufgeladen und proportional zur auftreffenden Strahlung entladen. Der Grad der Entladung kann als Maß für die Dosis jederzeit direkt abgelesen werden, und zwar an einer Skale, hinter der bei Durchsicht die Stellung des Elektrometerfadens sichtbar ist. Zur Messung der Ortsdosisleistung bedient man sich kleiner Dosisleistungsmesser, die ein Geiger-Müller-Zählrohr enthalten. Die Eichung erfolgt meist mit Co 60.

# XVIII. Einrichtungen für röntgenographische Analysenverfahren

Gemeinsamer Bestandteil aller Einrichtungen für röntgenographische Analysenverfahren ist eine *Röntgenröhre* zur Erzeugung der erforderlichen Röntgenstrahlung (Frequenz- und Wellenlängenbereich im Spektrum der elektromagnetischen Schwingungen s. Tafel 7, S. 5). Diese Röhre hat eine Anode aus Cu, Co, Cr, Fe, Mo, Wo, Ni oder Ag, an der beim Auftreffen der Elektronen die Strahlung ausgelöst wird, und zwar auf zweierlei Weise: durch das Abbremsen der Elektronen im elektrischen Feld der Atomkerne als „Bremsstrahlung" und durch die Ionisierung der Atome als charakteristische „Eigenstrahlung". Die konstante Gleichspannung

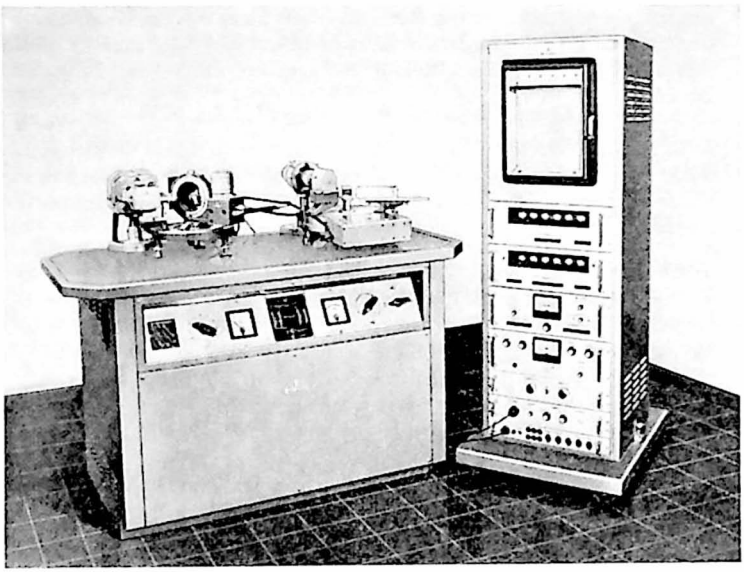


Bild 189 KRISTALLOFLEX 4 mit Textur-Goniometer für Feinstrukturuntersuchungen und mit Zählrohr-Goniometer für Fluoreszenzanalysen; daneben Meßgeräteschrank mit eingebautem KOMPENSOGRAPH

zum Betrieb der Röntgenröhre wird von einem *Röntgenapparat* KRISTALLOFLEX 4 (Bild 189) geliefert. Mit ihm lassen sich Röhrenspannungen von 20 bis 60 kV und Röhrenströme von 6 bis 50 mA erzeugen.
Röntgenographische Analysen können als Beugungs- oder Fluoreszenzanalysen durchgeführt werden.

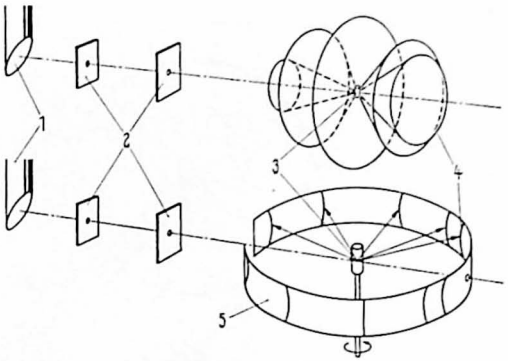
*Beugungsanalysen.* Da die Wellenlänge $\lambda$ der ausgelösten Eigenstrahlung von der Größenordnung der Netzebenenabstände $d$ im Kristallgitter fester Stoffe ist, wird die Strahlung, wenn sie auf kristalline Substanzen trifft, an den Kristallen gebeugt: Man erhält durch Interferenz ein Röntgenspektrum, daß von der Art des Gitteraufbaus der bestrahlten Materie abhängt. Das bedeutet, daß man den kristallinen Aufbau der Materie, die sogenannte Feinstruktur, mit Hilfe der Beugung von Röntgenstrahlen untersuchen und Veränderungen bei wechselnden äußeren Einflüssen messend verfolgen kann. Der Zusammenhang zwischen der Wellenlänge $\lambda$ der Strahlung, dem Netzebenenabstand $d$ des Kristallgitters und dem Reflexionwinkel $\vartheta$ (Glanzwinkel) ist gegeben durch die Bragg'sche Beziehung

$$2\,d \sin \vartheta = n\,\lambda \qquad (n = 1,2,3,\ldots).$$

Mißt man also bei der Analyse einer kristallinen Substanz die Beugungswinkel $2\,\vartheta$ —Voraussetzung ist $\lambda = \text{const}$—, so kann man die Netzebenenabstände $d$ des Gitters errechnen und dadurch die Gitterstruktur bestimmen.

*Fluoreszenzanalysen (Röntgen-Spektralanalysen).* Wird ein Präparat mit Röntgenstrahlen so hoher Intensität bestrahlt, daß es zum Aussenden von Fluoreszenzstrahlung angeregt wird, dann kann diese Fluoreszenzstrahlung an einem Analysatorkristall mit bekanntem Netzebenenabstand spektral zerlegt und das Spektrum mit einem Detektor abgetastet werden. Aus dem Netzebenenabstand $d$ des Kristalls und den gemessenen Winkellagen der Spektrallinien kann man auf die Zusammensetzung des untersuchten Materials schließen.
Beugungsanalysen werden sowohl nach dem Filmkammer-Verfahren als auch mit einem Zählrohr-Goniometer (als Diffraktometer) durchgeführt, Fluoreszenzanalysen nur mit einem Zählrohr-Goniometer (als Spektrometer).

*Filmkammer-Verfahren* sind u. a. das Debye-Scherrer-Verfahren (Bild 190), das Drehkristallverfahren und das Laue-Verfahren (Bild 191). Beim ersteren werden pulverförmige Präparate oder mikrokristalline Festkörper

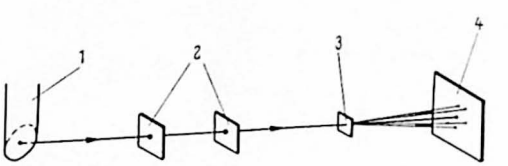



1 Röntgenröhre
2 Blenden
3 Präparat
4 Interferenzkegel
5 Zylinderförmig angeordneter Film

Bild 190
Debye-Scherer-Verfahren. Entstehung von Röntgeninterferenzen beim Durchstrahlen eines Pulverpräparates in einer Zylinderkammer

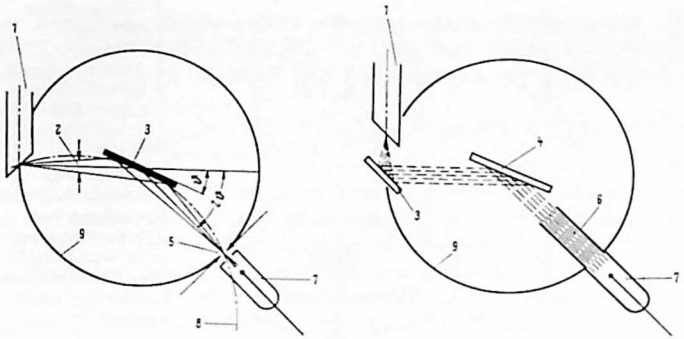
mit monochromatischer Röntgenstrahlung durchstrahlt. Dabei ruht im allgemeinen das Präparat; es kann aber auch gedreht werden. Mit dem Drehkristallverfahren können stäbchenförmige Einkristalle mit monochromatischer Strahlung analysiert werden. Wie der Name des Verfahrens bereits andeutet, wird der Kristall bei der Analyse gedreht. Sowohl beim Debye-Scherrer-Verfahren als auch beim Drehkristallverfahren ist der zum Nachweis der Röntgeninterferenzen verwendete Röntgenfilm zylinderförmig angeordnet (Zylinderkammer). Das Laue-Verfahren arbeitet gegenüber den beiden anderen Verfahren mit polychromatischer Röntgenstrahlung. Mit ihm lassen sich Einkristalle im Rückstrahl- und im Durchstrahl-Bereich untersuchen. Aber auch z. B. Folien und Bleche können mit ihm auf Texturen hin untersucht werden. Als Indikator dient Planfilm (Flachkammer).

Die Bilder 192 *A* und 192 *B* zeigen die Strahlengänge von *Zählrohr-Goniometern* bei Beugungs- bzw. bei Fluoreszenzanalysen. Zählrohre und Szintillationszähler werden als Detektoren für Röntgenstrahlen in zu-




1 Röntgenröhre
2 Blenden
3 Präparat
4 Planfilm

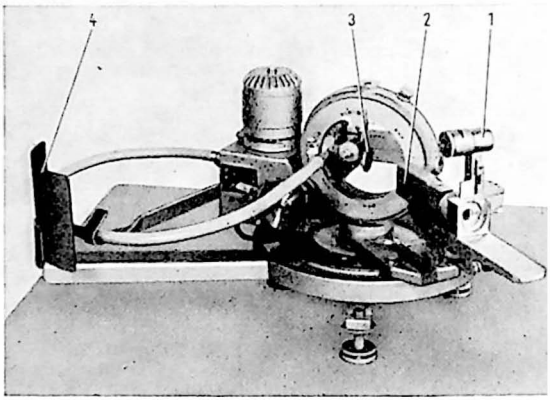
Bild 191
Laue-Verfahren. Untersuchung eines Einkristalls in einer Flachkammer



1 Röntgenröhre
2 Aperturblende
3 Präparat
4 Analysatorkristall
5 Zählrohrblende
6 Sollerblende
7 Detektor
8 Fokussierungskreis
9 Meßkreis

Bild 192 Strahlengang beim Zählrohr-Goniometer. *A* Beugungsanalyse (Diffraktometer). *B* Fluoreszenzanalyse (Spektrometer)

nehmenden Maße verwendet. Sie bringen gegenüber dem Filmkammerverfahren eine beträchtliche Zeitersparnis. — Bild 193 zeigt ein Textur-Goniometer für Rückstrahlaufnahmen, mit dem die vorzugsweise Orientierung von Kristallen in polykristallinen Proben (Bleche, Drähte, Gesteine, Kunststoffe und Textilfasern) untersucht werden kann.



1 Eingangsblende
2 Detektorträger
3 Probenträger
4 Primärstrahlfänger

Bild 193
Textur-Goniometer für Rückstrahlaufnahmen

## A

| | |
|---|---|
| A-battery | Heizbatterie |
| acceleration | Beschleunigung |
| acceptance test | Abnahmeprüfung |
| accessories | Zubehör |
| accuracy | Genauigkeit |
| actual value | Istwert |
| adjust | justieren, abgleichen |
| admittance | Scheinleitwert |
| aerial | Antenne, Freileitung |
| aging | Alterung |
| air gap | Luftspalt |
| alloy | Legierung |
| alternating current (ac) | Wechselstrom |
| alternator | Wechselstrom-generator |
| altitude | geogr. Höhe |
| ambient temperature | Raumtemperatur |
| ambiguity | Mehrdeutigkeit |
| ammeter | Strommesser |
| amount | Menge, Betrag |
| amplifier | Verstärker |
| analog computer | Analog-Rechen-maschine |
| angle | Winkel |
| angular frequency | Kreisfrequenz |
| apparent power | Scheinleistung |
| arc | Bogen, Lichtbogen |
| area | Fläche |
| armature | Anker |
| armoured cable | bewehrtes Kabel, Panzerkabel |
| arrester | Ableiter |
| ASA (American Standard Association) | Normenausschuß der USA |
| attendant | Wärter |
| attenuator | Abschwächer |
| attraction | Anziehung |
| audio frequency (af) | Tonfrequenz |
| automation | Technik der Automatisierung von Fertigungs-vorgängen |
| auto-transformer | Spartransformator |
| average | Mittelwert, Durchschnitt |

## B

| | |
|---|---|
| background | Untergrund |
| backlash | toter Gang, Lose |
| back reflection pattern | Rückstrahl-aufnahme |
| balance | abgleichen, kompensieren, wiegen, Waage |
| balanced deflection | symmetrische Ablenkung (Osz.) |
| balanced load | gleiche Belastung |
| band width | Bandbreite, Frequenz-bereich |
| bar | Stange, Schiene |
| bar magnet | Stabmagnet |
| base (basic) load | Grundlast |
| B-battery | Anodenbatterie |
| beam voltage | Strahlspannung (El. Mik.) |
| bezel ring | Frontring |
| bias | beeinflussen, einen zusätz-lichen Meßwert aufschalten |
| bias voltage | Gittervorspannung |
| binary-coded-decimal system | binär-dekadisches (tetradisches) System |
| binary counter | Festmengen-verschlüßler |
| binary digit (bit) | Binärziffer |
| binary system | Binärsystem |
| binding post | Anschlußklemme |
| binding screw | Klemmschraube |

| | |
|---|---|
| **blanking** | Wischer (Osz.) |
| **branch circuit** | Abzweigleitung, Lichtleitung |
| **branching point** | Verzweigungsstelle |
| **break contact** | Ruhekontakt |
| **breakdown** | Durchschlag, Störung |
| **bridge circuit** | Brückenschaltung |
| **brightness** | Helligkeit |
| **B.S.S. (British Standard Specification)** | Britische Normenvorschrift |
| **buffer** | Trennschaltung, Speicher in der Informationsübertragung |
| **bug** | Fehler |
| **buried cable** | Erdkabel |
| **bus-bar** | Sammelschiene |
| **bushing-type current transformer** | Durchführungsstromwandler |
| **buzzer** | Summer |

# C

| | |
|---|---|
| **cable joint** | Kabelmuffe |
| **cable lug** | Kabelschuh |
| **cable sheath** | Kabelmantel |
| **calibration** | Eichung |
| **caliper** | Lehre |
| **cam plate** | Kurvenscheibe |
| **cancel** | streichen, auslöschen |
| **capacitance** | Kapazität eines Kondensators |
| **capacitor** | Kondensator |
| **capacity** | Kapazität, Leistungsfähigkeit, Fassungsvermögen |
| **carrier frequency** | Trägerfrequenz |
| **case** | Gehäuse |
| **cathode-ray oscillograph (oscilloscope)** | Elektronenstrahl-Oszillograph |
| **C-battery** | Gittervorspannungsbatterie |
| **center** | Mitte, Mittelpunkt |
| **change** | Änderung |
| **channel** | Kanal |
| **characteristic** | Kennlinie |
| **characteristic impedance** | Wellenwiderstand |
| **chracteristic radiation** | Eigenstrahlung |
| **charge** | Ladung |
| **chart reader** | Diagrammabtaster |
| **choke** | Drossel |
| **choking coil** | Drosselspule |
| **chopper** | Zerhacker |
| **chopper bar** | Fallbügel |
| **circuit** | Stromkreis |
| **circuit breaker** | Ausschalter, Unterbrecher |
| **circular chart recorder** | Kreisblattschreiber |
| **coarse** | grob |
| **coating** | Belag, Schicht, Überzug |
| **coil** | Spule |
| **coil-loaded cable** | Pupin-Kabel |
| **commutator** | Umschalter, Stromwender, Kommutator |
| **comparison** | Vergleich |
| **component part** | Bauteil |
| **conductance** | Wirkleitwerk |
| **conductivity** | Leitfähigkeit |
| **conductor** | Leiter |
| **connect** | verbinden, anschließen |
| **contact bounce** | Kontaktprellung |
| **contactor** | Schaltschütz |
| **continuously loaded cable** | Krarup-Kabel |
| **control** | steuern, regeln, überwachen, Stellorgan |
| **converter** | Umformer, Umsetzer |
| **core** | Kern, Ader |
| **counter emf.** | Gegen-EMK |
| **coupler plug** | Gerätestecker |
| **cover** | Hülle, Deckel |

| | |
|---|---|
| creeping (creepage) distance | Kriechstrecke |
| crest voltage | Scheitelspannung |
| critical damping | aperiodische Dämpfung |
| crossed-coil mechanism | Kreuzspul-meßwerk |
| current | Strom |
| current intensity | Stromstärke |
| current transformer (c.t.) | Stromwandler |
| cut core | Schnittkern |

# D

| | |
|---|---|
| damping | Dämpfung |
| data processing (handling) | Meßwert-verarbeitung |
| dead | stromlos |
| dead-beat galvanometer | aperiodisch gedämpftes Galvanometer |
| decimal system | Dezimalsystem |
| decoder | Entschlüßler, Digital-Analog-Umsetzer |
| decrease | Abfall |
| deflection | Ausschlag, Ablenkung |
| deflection balance | Wegvergleich |
| deflection plate | Ablenkplatte (Osz.) |
| degenerative coupling (feedback) | Gegenkoppelung |
| delay | Verzögerung |
| delta voltage | Dreieckspannung |
| density | Dichte |
| design | Ausführung, Konstruktion |
| deviation | Abweichung |
| dial | Skalenscheibe |
| diameter | Durchmesser |
| diaphragm | Membran |
| dielectric loss angle | Verlustwinkel |
| dielectric strength | Durchschlag-festigkeit |
| diffraction pattern | Beugungs-erscheinung |
| digital computer | Ziffern-rechenmaschine |
| direct current (dc) | Gleichstrom |
| discharge | Entladung |
| disk | Scheibe |
| dismantle | auseinandernehmen, abbauen, entfernen |
| display | entwerfen, darstellen (z. B. auf einem Oszillographenschirm) |
| disruptive strength | Durchschlag-festigkeit |
| distance | Entfernung |
| distance balance | Wegvergleich |
| distortion | Verzerrung |
| division | Teilstrich |
| double-pole double-throw switch | Umschalter, zweipoliger Schalter mit zwei Stellungen |
| drift | Abweichung, Nullpunkt-wanderung |
| driven sweep | einmalige Ablenkung (Osz.) |
| drop | Abfall |
| drum-chart recorder | Trommelschreiber |
| dummy coil | Hilfsspule |
| dust proof | staubdicht |

# E

| | |
|---|---|
| earth | Erde, Erdschluß |
| eddy current | Wirbelstrom |
| efficiency | Wirkungsgrad |
| elastance | Kehrwert der Kapazität |
| electric flux density | dielektrische Verschiebung |
| electric force | elektrische Feldstärke |

| | |
|---|---|
| **electron shell** | Elektronenschale (Atom) |
| **emf** | EMK |
| **encoder** | Verschlüßler, Analog-Digital-Umsetzer |
| **endurance test** | Dauerprüfung |
| **equivalent circuit diagram** | Ersatzschaltbild |
| **erase** | löschen (Tonband) |
| **error** | Fehler |
| **error in indication** | Anzeigefehler |
| **etched wiring** | geätzte Schaltung |
| **even number** | gerade Zahl |
| **event** | Vorgang |
| **excitation** | Erregung |
| **expansion** | Ausdehnung |
| **explosion proof** | explosionsgeschützt |
| **external-field influence (ASA)** | Fremdfeldeinfluß |
| **external-temperature influence (ASA)** | Temperatureinfluß |

## F

| | |
|---|---|
| **fault location** | Fehlerortung |
| **faulty connection** | Verschaltung |
| **feed** | speisen, Vorschub |
| **feedback** | Rückkoppelung |
| **feeder** | Speiseleitung |
| **ferrodynamic element** | eisengeschlossenes elektrodynamisches Meßwerk |
| **field intensity** | Feldstärke |
| **filament lamp** | Glühlampe |
| **fire** | zünden |
| **fission** | Spaltung (Kern) |
| **flame proof** | schlagwettergeschützt |
| **flashover** | Überschlag |
| **fluorescent screen** | Leuchtschirm |
| **flush mounting** | Einbau (in Meßtafel) |
| **flux** | Fluß, Kraftfluß |
| **focal length** | Brennweite |
| **focus** | Scharfstellung, Schärfe |
| **force** | Kraft |
| **force balance** | Kraftvergleich |
| **four terminal network** | Vierpol |
| **free-running sweep** | periodische Ablenkung (Osz.) |
| **frequency response** | Frequenzgang, Frequenzbereich |
| **friction** | Reibung |
| **fulcrum** | Drehpunkt |
| **full-scale value** | Skalenendwert |
| **fundamental frequency** | Grundfrequenz |
| **fuse** | Sicherung |
| **fusion** | Verschmelzung |

## G

| | |
|---|---|
| **gage (gauge)** | eichen, messen, Lehre, Meßgerät |
| **gain** | Verstärkung |
| **gasket** | Dichtungsring |
| **gate** | Gatter, Torschaltung |
| **glancing angle** | Glanzwinkel |
| **glow discharge lamp** | Glimmlampe |
| **graduation** | geeichte Teilung |
| **graduation line** | Teilstrich |
| **grain size** | Korngröße |
| **graphic panel** | Schematafel, Betriebsschaubild |
| **graticule** | Raster |
| **gravity** | Wichte, Schwere |
| **grazing incidence** | streifender Eintritt (Röntgenstrahl) |
| **grid** | Gitter(Elektronenröhre), Netz |
| **grid bias** | Gittervorspannung |
| **ground** | Erde |

## H

| | |
|---|---|
| harmonic analyzer | Oberwellenmesser |
| harmonics | Oberwellen |
| heat | Wärme |
| high tension (ht) | Hochspannung |
| horizontal deflection | X-Ablenkung (Osz.) |
| horseshoe magnet | Hufeisenmagnet |
| hose-proof | schwallwasserfest |
| hot-wire instrument | Hitzdrahtinstrument |
| hum | Brumm, summen |
| hum level | Störpegel |
| humidity | Luftfeuchte |

## I

| | |
|---|---|
| idle current | Leerlaufstrom, Blindstrom |
| ignition | Zündung |
| impact strength | Schlagfestigkeit |
| impedance | Scheinwiderstand |
| inclusion | Einschluß |
| increment | Zuwachs |
| indication | Anzeige |
| inductance | Induktivität |
| inertia | Trägheitsmoment |
| input impedance | Eingangswiderstand |
| instantaneous value | Momentanwert |
| instrument transformer | Wandler |
| insulation | Isolation |
| insulator | Isolator |
| integer | ganze Zahl |
| integrating meter | elektrischer Zähler |
| intensity | Stärke, Stromstärke, Helligkeit (Osz.) |
| intensity of magnetization | Magnetisierung |
| interlinked | verkettet |
| inverse feedback | negative Rückkoppelung |
| inverted rectifier (inverter) | Wechselrichter |
| iron-clad | eisenbewehrt, eisengekapselt |
| iron-core mechanism | eisengeschlossenes Meßwerk |

## J

| | |
|---|---|
| jewel bearing | Spitzenlager |
| jitter | zittern, Synchronisationsfehler, Schaukeleffekt |
| joint | Verbindung Muffe |
| journal bearing | Zapfenlager |

## K

| | |
|---|---|
| key | Taste, Schalter |
| kiln | Darrofen, Brennofen |
| knife-edge pointer | Messerzeiger |

## L

| | |
|---|---|
| lag | nacheilen (in Phase), Phasennacheilung |
| laminated | geschichtet |
| layer | Schicht, Lage |
| lead | voreilen (in Phase), Phasenvoreilung |
| leakage current | Streustrom |
| leakage path | Kriechweg |
| leakance | Kehrwert des Isolationswiderstandes |
| lehr | Kühlofen mit kontinuierlichen Zonenkammern |
| length | Länge |
| lens | Linse |

| | |
|---|---|
| lid | Deckel |
| light spot | Lichtmarke |
| limiter | Begrenzer |
| limit stop | Grenzanschlag |
| line fault | Leitungsfehler |
| line voltage | Netzspannung |
| live parts | spannungführende Teile |
| load | Last, Belastung |
| logger | Meßwertschreiber |
| log sheet | Protokoll |
| loss | Verlust |
| loss factor | Verlustfaktor (tan $\delta$) |
| lost motion | toter Gang |
| lumped loaded cable | pupinisiertes Kabel |

## M

| | |
|---|---|
| magazine | Kassette |
| magnetic amplifier | magnetischer Verstärker |
| magnetic field strength | magnetische Feldstärke |
| magnetic flux | magnetischer Kraftfluß |
| magnetic flux density | magnetische Induktion |
| magnetic-platform influence (ASA) | Einbaueinfluß |
| magnetizing force | magnetische Feldstärke |
| magnetomotive force | magnetische Spannung |
| mains | Netz |
| mains frequency | Netzfrequenz |
| make contact | Arbeitskontakt |
| mean | mittel, Durchschnitt |
| means | Mittel, Weg |
| measure | messen, Maß |
| measuring range | Meßbereich |
| mechanism (ASA) | Meßwerk |
| megger | Megohmmeter |
| memory | Speicher |
| mesh voltage | verkettete Spannung |
| meter | elektr. Zähler |
| mica | Glimmer |
| minute | fein, äußerst klein |
| mirror galvanometer | Spiegelgalvanometer |
| mirror scale | spiegelunterlegte Skale |
| modular design | Baukastenprinzip |
| module | Baustein |
| moisture | Feuchte |
| motion | Bewegung |
| motion balance | Wegvergleich |
| movement | Meßwerk |
| moving-coil mechanism | Drehspulmeßwerk |
| moving-iron mechanism | Dreheisenmeßwerk |
| moving-magnet mechanism | Drehmagnetmeßwerk |
| mutual inductance | Gegeninduktivität |

## N

| | |
|---|---|
| natural frequency | Eigenfrequenz |
| negative feedback | Gegenkoppelung |
| network | Netzwerk, Netz |
| noise level | Rauschpegel |
| nomograph | Nomogramm |
| null-balance amplifier | Nullabgleich-Verstärker |

## O

| | |
|---|---|
| odd number | ungerade Zahl |
| off | Aus, Zu |
| off-normal memory | Störungsspeicher |
| on | Ein, Auf |
| on-off controller | Zweipunktregler (Auf-Zu-Regler) |
| oscillating (oscillatory) circuit | Schwingkreis |
| outlet | Auslaß |
| output | Ausgang, Leistung |

| | |
|---|---|
| overhead line | Freileitung |
| overload capacity | zulässige Überlastung |
| overshoot | Überschwingung |

# P

| | |
|---|---|
| page printer | Blattdrucker |
| pancake coil | Flachspule |
| panel | Tafel,Meßtafel |
| parity check | Gleichheitsprüfung |
| pattern | Muster, Bauart |
| peak load | Spitzenlast, Höchstlast |
| peak to peak (p-p) | Spitze zu Spitze (Scheitelspannung) |
| pen | Schreibfeder |
| performance | Leistungsfähigkeit, Ausführung |
| permanent magnet | Dauermagnet |
| permeability | Permeabilität |
| permeance | magnetischer Leitwert |
| permittance | Kapazität eines Kondensators |
| permittivity | spezifische Kapazität, Dielektrizitätskonstante |
| persistence | Nachleuchtzeit (Osz.) |
| phase-defect angle | Verlustwinkel ($\delta$) |
| phase lag | Phasenverzögerung |
| phase lead | Phasenvoreilung |
| phase sequence indicator | Drehfeldrichtungszeiger |
| phase shifter | Phasenschieber |
| phenomenon | Vorgang |
| pickup | Abgriff |
| pivot | Drehzapfen, drehbar lagern |
| plant | Anlage, Fabrik |
| plan view | Ansicht |
| plate | Anode |
| plug | Stöpsel, Stecker |
| plug-in unit | Steckeinheit, Einschub |
| plunging coil | Tauchspule |
| pointer | Zeiger |
| pole | Mast |
| pole changer | Stromwender |
| pole shoe | Polschuh |
| polyphase current | Mehrphasenstrom, Drehstrom |
| position influence (ASA) | Lageeinfluß |
| potential | Spannung |
| potentiometer | Kompensator |
| power | Kraft, Leistung |
| power factor | Leistungsfaktor |
| power plant (station) | Kraftwerk |
| pressure gauge | Druckmesser |
| primary | Primärwicklung |
| printed circuit | gedruckte Schaltung |
| printout | Niederschrift, Druck (Daten) |
| probability | Wahrscheinlichkeit |
| process | Verfahren |
| projecting mounting | Aufbau (auf Meßtafel) |
| property | Eigenschaft |
| proportional band | Proportionalbereich |
| proportional plus reset action controller | Proportional-Integral-Regler (PI) |
| proportional plus reset plus rate action controller | Proportional-Integral-Regler mit Vorhalt (PID) |
| proportional speed floating action | Spezialfall der Proportional-Integral-Regelung |
| protecting tube | Schutzrohr |
| pull switch | Zugschalter |
| pulse | Impuls |
| puncture | Durchschlag |
| push button control | Druckknopfsteuerung |
| push pull | Gegentakt |

## Q

| | |
|---|---|
| **quality factor** | Gütefaktor |

## R

| | |
|---|---|
| **rack** | Gestell |
| **radiation** | Strahlung |
| **radio frequency (rf)** | Hochfrequenz |
| **range** | Bereich |
| **rate of change** | Änderungsgeschwindigkeit |
| **rated value** | Nennwert |
| **rating** | Bemessung |
| **ratio** | Verhältnis |
| **reactance** | Blindwiderstand |
| **reactor** | Drossel |
| **reading** | Ablesung, Anzeige |
| **readout (digital)** | Ziffernanzeige |
| **receiver** | Empfänger |
| **recorder** | Schreiber |
| **recording controller** | schreibender Regler |
| **recording oscillograph** | Lichtstrahl-Oszillograph |
| **recovery time** | Einstellzeit, Beruhigungszeit |
| **rectifier** | Gleichrichter |
| **recurrent phenomenon** | periodischer Vorgang (Osz.) |
| **recurrent sweep** | periodische Ablenkung (Osz.) |
| **reed-type frequency meter** | Zungenfrequenzmesser |
| **reflecting galvanometer** | Spiegelgalvanometer |
| **regenerative coupling** | Rückkopplung |
| **regulator** | Regler |
| **reluctance** | magnetischer Widerstand |
| **reluctivity** | spezifischer magnetischer Widerstand, Kehrwert der Permeabilität |
| **remote control** | Fernsteuerung |
| **repeater** | Verstärker (Fernm.) |
| **repulsion** | Abstoßung |
| **research** | Forschung |
| **residual magnetism** | Remanenzmagnetismus |
| **resistance** | Widerstand als Eigenschaft, Wirkwiderstand |
| **resistance thermometer** | Widerstandsthermometer |
| **resistivity** | spezifischer Widerstand |
| **resistor** | Widerstand, Widerstandskörper |
| **resolving power, resolution** | Auflösungsvermögen |
| **response time** | Einstellzeit |
| **rest contact** | Ruhekontakt |
| **return current** | Rückstrom |
| **revolution** | Umdrehung |
| **ribbon** | Band |
| **ripple voltage** | Brummspannung, Oberwellenspannung |
| **rise time** | Anstiegzeit (Osz.) |
| **rod** | Stange, Stab |
| **root-mean-square value (rms-value)** | Effektivwert |
| **rugged** | robust |

## S

| | |
|---|---|
| **sample** | Probe, Prüfling |
| **saturation** | Sättigung |
| **saw-tooth voltage** | Sägezahnspannung |
| **scale** | Skale |
| **scan** | abtasten |
| **scatter** | streuen |
| **scattered radiation** | Streustrahlung |
| **screen** | schirmen, Abschirmung, Leuchtschirm (Osz.) |

| | |
|---|---|
| **secondary** | Sekundär-wicklung |
| **selector switch** | Wählschalter |
| **self excitation** | Eigenerregung |
| **self inductance** | Selbstinduktivität |
| **sensitivity** | Empfindlichkeit |
| **sequence** | Folge |
| **series connection** | Reihenschaltung |
| **series resistor** | Vorwiderstand |
| **setting** | Einstellung |
| **shaft** | Achse, Welle |
| **shield** | schirmen, Abschirmung |
| **short-circuit** | Kurzschluß |
| **shunt** | Nebenwiderstand |
| **shutter** | Verschluß |
| **slide wire** | Schleifdraht |
| **socket** | Fassung, Muffe, Steckdose |
| **solution** | Lösung |
| **space encoder** | Scheiben-verschlüßler |
| **span** | Spannweite, Bereich |
| **spark gap** | Funkenstrecke |
| **spacial encoder** | Scheiben-verschlüßler |
| **specimen** | Probe, Prüfling |
| **speed** | Geschwindigkeit |
| **splash-proof** | spritzwasserfest |
| **spring** | Feder |
| **stage** | Stufe |
| **standard cell** | Normalbatterie |
| **star voltage** | Sternspannung |
| **stationary pattern** | stehendes Bild (Osz.) |
| **step** | Stufe |
| **storage battery** | Akku, Sammler |
| **strand** | flechten, Litze |
| **stray field** | Fremdfeld |
| **strip-chart recorder** | Bandschreiber |
| **supersonic wave** | Ultraschallwelle |
| **surface tension** | Oberflächen-spannung |
| **surge** | Spannungsstoß |
| **surge impedance** | Wellenwiderstand |
| **susceptance** | Blindleitwert |
| **susceptibility** | Suszeptibilität |
| **sustained-operation influence (ASA)** | Anwärmeinfluß |
| **sweep** | *X*-Ablenkung |
| **sweep expansion** | Zeitdehnung |
| **sweep generator** | Kippgenerator |
| **sweep-time encoder** | Sägezahn-verschlüßler |
| **switch** | Schalter |
| **switch gear** | Schaltgerät |
| **synchro** | Drehmelder |

# T

| | |
|---|---|
| **tape-wound core** | Bandkern |
| **target (of a tube)** | Anode |
| **taut-strip (band) suspension** | Spannband-lagerung |
| **telemetering** | Fernmessung |
| **tension** | Spannung (insbesondere mechanische) |
| **terminal** | Anschlußklemme |
| **test voltage** | Prüfspannung |
| **thermal converter** | Thermo-umformer |
| **thermionic valve** | Elektronenröhre |
| **thermocouple** | Thermoelement |
| **thermocouple instrument** | Instrument mit Thermo-umformer |
| **thermopile** | Thermosäule |
| **thread** | Gewinde |
| **three-phase current** | Drehstrom |
| **three-term controller** | PID-Regler |
| **threshold value** | Schwellwert |
| **time** | Zeit |
| **time base** | Zeitablenkung (Osz.) |
| **time-base encoder (time encoder)** | Sägezahn-verschlüßler |
| **toggle switch** | Knebelschalter |
| **tolerance** | zulässige Abweichung, Toleranz |
| **torque** | Drehmoment |

| | |
|---|---|
| **trace** | zeichnen, pausen, schreiben, Aufzeichnung |
| **transducer** | Meßumformer |
| **transformer** | Transformator, Wandler |
| **transient** | einmaliger schnell-veränderlicher Vorgang |
| **transmission pattern** | Durchstrahl-aufnahme |
| **transmit** | übertragen, senden |
| **travelling wave** | Wanderwelle |
| **trigger** | auslösen, Auslöseimpuls |
| **trouble-shooting** | Fehlersuche |
| **tumbler switch** | Kippschalter |
| **tune** | abstimmen |
| **two-position controller** | Zweipunktregler |
| **two-term controller** | PI-Regler |

## U

| | |
|---|---|
| **unit** | Einheit |
| **unitized construction** | Baukasten-prinzip |
| **unity** | Wert Eins |
| **upset** | Störung |

## V

| | |
|---|---|
| **value** | Wert |
| **vane** | Dämpfungsflügel, Fähnchen |
| **variation** | Änderung, Abweichung |
| **variation in indication (B.S.S.)** | Änderung der Anzeige durch Einflußgrößen |
| **varmeter** | Blindleistungs-messer |
| **velocity** | Geschwindigkeit |
| **vernier** | fein, Feinein-stellung |
| **vertical section** | Aufriß |
| **vibrator** | Schleifen-schwinger (Osz.), Zerhacker |
| **video signal** | Bildsignal |
| **void** | Leerstelle, Loch |
| **voltage comparison (feedback) encoder** | Stufenverschlüßler, Momentanwert-umsetzer |
| **voltage divider** | Spannungsteiler |
| **voltage drop** | Spannungsabfall |
| **voltage transformer** | Spannungs-wandler |

## W

| | |
|---|---|
| **washer** | Unterlegscheibe |
| **wattmeter** | Leistungsmesser |
| **wave** | Welle |
| **wear** | Abnutzung, Verschleiß |
| **weight** | Gewicht |
| **wing nut** | Flügelschraube |
| **wire strain gauge** | Dehnungsmeß-streifen |
| **wiring diagram** | Schaltbild |

## X

| | |
|---|---|
| **X-rays** | Röntgenstrahlen |

## Y

| | |
|---|---|
| **yield** | liefern, ergeben (Resultat) |

## Z

| | |
|---|---|
| **zero adjuster** | Nullpunktrücker |
| **zero drift** | Nullpunkt-abweichung, Nullpunkt-wanderung |
| **zero position** | Nullage |

# Stichwörter


Ablaufaufnahmen 89, 99
Ablenkgenerator 93
Ablenkkoeffizient 95, 100, 103, 106
Ableselupe 62, 121, 215
Ablesevorrichtungen für Spiegelgalvanometer 123
Abschirmung 40, 42, 106
Aderndifferenz-Messung 214
Adernprüfung 214
Adernvergleich 211, 214
Admittanz 19
α-Strahlen 257
Analog/Digital-Umsetzer 108
Analoge Meßwertdarstellung 108
Analysenverfahren, Einrichtungen für röntgenographische 263
Anschlußklemmen, Bezeichnung, von Spannungswandlern 194
—, —, von Stromwandlern 184
Anschlußwerte von Anzeigeinstrumenten 58
— von Schreibermeßwerken 72
Anzeige, -bereich, -fehler 27
Anzeigefehler, zulässige 29
Anzeigeinstrumente 47
—, Eigenverbrauch 59, 60
—, Meßbereichendwerte oder Anschlußwerte 56, 58
Arithmetische Mittelwerte, Messung 147, 151
Aron-Schaltung 156, 157
Astasierung 40
Astatische Präzisions-Leistungsmesser 61, 162
Aufzeichnungsbreiten und -längen von Schreibern 64
Augenblickswert 18
—, Messung 170, 234
Ausbrennen 238, 240
Ausgleichswiderstand 218
Auslösezählrohre 259
Ausschlagsvergleich 201, 207
— -Meßeinrichtungen 207, 216
Automatische Meß- und Sortiereinrichtung 110, 112
Außenliegende Nebenwiderstände 115
Außenliegende Vorwiderstände 117
Außenzähler 258
Außenmagnet-Bauweise 36
Äußerer Grenzwiderstand 125, 127
A-Veff-MULTIZET (Dreheisen-) 54, 56, 144
A-V-Ω-MULTIZET 53, 56, 149, 221

Ballenelektroden 207
Ballistische Galvanometer 130
— Konstante 125, 127
— Messungen 220, 232
Bauformen von Instrumenten für Schalttafeln und Geräte 48
— von Schreibern 64
Baugrunduntersuchungen 143
Befestigung von Schalttafelinstrumenten 50
Beruhigungszeit 27, 126, 127
β-Strahlen 257
Betriebsbürde 178
Betriebsinstrumente 47, 108, 113, 118, 144, 147, 160
—, Eigenverbrauch 59
—, Meßbereichendwerte oder Anschlußwerte 58
Betriebsmeßbrücken 207
Beugungsanalysen 264
Bewegliches Organ 27
Bimetallmeßwerk 32, 35, 45
Bleikammer 261
Blind..., Grundgleichungen 19
Blindkomponenten, Messung 174
— -Kompensator 175
Blindleistung/Leistungsfaktor 161
Blindleistungsmesser 58, 158, 160
Blindleistungsmessung 158, 162
Braunsche Röhre 44
Bragg'sche Beziehung 264
Bremsstrahlung 263
Brenn-Phasen 241
Bürde 178, 181
Bürdenmeßeinrichtung, Wandler- und 245

Cos β, Ermittlung 247
cos φ, Messung 165
*C*-tan δ-Meßbrücke, Universal- 223
Cu-Drähte, Abmessungen und Widerstandswerte 9

Dämpfung 27
— von Meßwerken 37, 39, 41, 43, 67
— von Galvanometern 126
— von Schwingern 37, 38, 84
Dämpfungswiderstand 127
Darstellungen von Meßinstrumenten u. -geräten in Schaltzeichnungen 33
Dauerbelastungen von Stromwandlern bei Nennbürde, zulässige 182
Dauermagnet-Werkstoffe, Eigenschaften 13
Dauer-Zähler-Prüfeinrichtungen 250
Debye-Scherrer-Verfahren 264
Dehnungseinrichtung 95
Diagrammabtaster, elektronischer 78
Dielektrizitätskonstante 3, 4
Differentiationsdrossel 171, 174
Differentiationskreis 172
Differenzrechner 110
Diffraktometer 264
Digital-Betriebsmeßeinrichtung 108, 11
Digitale Meßwert-Darstellung 108
Digitales Fernmeßverfahren 230
Digital-Meßgeräte 108
Digital-Ohmmeter 108
DIGIZET-System 108, 111
Direktsicht-Taschendosimeter 262
Diskriminator 261
Doppelfrequenzmesser 168
Doppelisolator-Wandlerkombination 196
Doppelmeßbrücken 202, 212, 216, 218
Doppelspannungsmesser 168
Doppel-Spannungswandler 197
Doppelspul-Lichtmarken-Galvanometer 128
Doppel-Supergalvanometer 122, 124, 130
Drallfeldverfahren 243
Dreheisenmeßwerk 32, 34, 41
Dreheisen-MULTIZET 54, 56, 144
Dreheisen-Quotientenmeßwerk 32, 34
— -Spannungsmesser 118, 144
— -Strommesser 118, 144
Drehkristall-Verfahren 264
Drehmagnetmeßwerk 32, 35, 42
Drehmagnet-Quotientenmeßwerk 32, 35
— -Strommesser 114
Drehmomentkompensations-Verfahren 226, 227
Drehphasenschieber 170
Drehschalter, Präzisions- 207, 216
— -Doppelmeßbrücke 202, 218
Drehschaltermeßbrücke 202, 207, 218
Drehspulmeßwerk 32, 34, 36, 113, 147
Drehspul-Quotientenmeßwerk 32, 34,38
— -Spannungsmesser 113, 147
— -Strommesser 113, 147
Drehstromzähler-Prüfeinrichtungen 248
Dreifarbenschreiber 68
Dreipolig isolierte Wandler 197
Dreipunktmethode, Fehlerortung nach der 214
Dunkelfeldmikroskopie 256
Durchführungswandler 189
Durchschlagsfestigkeit, Prüfung 238
Durchsteck-Kleinwandler 187
Durchstrahlungs-Elektronenmikroskop 252
Dynode 22, 260

Effektivwert 18
—, Messung 42, 43, 145, 147, 151, 174, 236, 244
Eigenschaften elektrischer Isolierstoffe 14, 15
— elektrischer Leiter 9, 10, 11
— magnetisch weicher Werkstoffe 12
— von Dauermagnet-Werkstoffen 13
Eigenstrahlung 263
Eigensynchronisierung 94
Eigenverbrauch 27
— von Betriebsinstrumenten 59
— von Feinmeßinstrumenten 60
— von Schreibern 72
Einbauart von Wandlern, Symbole 185
Einbereich-Gleichspannungsverstärker 120
— -Gleichstromverstärker 119
Einfluß, zulässiger 29
Eingangsscheinwiderstand von Elektronenstrahl-Oszillographen 106
Eingangsspannungsteiler für Elektronenstrahl-Oszillographen 96
Einheiten 2, 3, 4, 5, 6, 7
Einknopf-Meßbrücke 202, 208
Einleiterwandler 181, 187
Einpolig isolierte Wandler 191, 197
Einschlag- u. Einspreizelektroden 207

Einstellbereich von Meßbrücken 202
Einstrahl-Röhre 44
Eisengeschlossene Meßwerke 32, 39, 40, 166
Eisenlose Meßwerke 32, 40, 162
Eisen-Meßeinrichtungen 231
Elektrische Anzeigeinstrumente 47
— Energie eines Kondensators 20
— Größen 3, 4
— Isolierstoffe, Eigenschaften 14, 15
— Leiter, Eigenschaften 9, 10, 11
— Prüfeinrichtungen 238
— Schreiber 63
— Wirkungen, in der Elektromeßtechnik ausgenutzte 34
Elektrochemische Spannungsreihe der Ionenleiter 9
Elektrodynamische Dämpfung bei Meßwerken 37, 84
Elektrodynamisches Meßwerk 32, 34, 39, 62, 162
— Quotientenmeßwerk 32, 34, 166
— Schleifenschwinger-Meßwerk 41
Elektrometer 32, 35, 43, 133, 262
Elektronenmikroskopie 252
Elektronenoptik 225
Elektronenstrahlen 252
Elektronenstrahl-Oszillographen 80, 93
Elektronenstrahlröhre 44
Elektronische Grenzwertmelder 50
— Nullindikatoren 149
Elektronischer Diagrammabtaster 78
— Präzisionsschreiber KOMPENSOGRAPH 64, 65, 70, 73
— Schalter 97
— Steuergerät 99
Elektrostatisches Meßwerk 32, 35, 43, 134
Elektrostriktion 25
Elektrothermischer Vorgang 24
Ellipsenlenker 66
ELMISKOP I 253
Empfindlichkeit 27
— bei Oszillographen 82, 83, 95, 100, 103, 106
Entwicklungsautomat für Oszillographen 88, 103
Epstein-Rahmen 231, 232
— -Meßplatz 235
Erdungsmesser 142
Erdschlußstromerfassung 186
Erdschlußwicklung 193, 194
Externe Synchronisierung 94

Fahrbarer Epstein-Meßplatz 235
Fahrbare Zähler-Aufhängegestelle 248
Fehlangabe, Fehler 27
Fehlergrenzen elektrischer Meßgeräte, Klasseneinteilung und 29
Fehlerortungen an Kabeln 210, 213, 215, 243
— — — und Freileitungen 242
Fehlerortung, kapazitive 214
— nach der Dreipunktmethode 214
— nach Heinzelmann 214
— nach Murray 211, 214
— nach Varley 210
Fehlwinkel 178
—, Messung 246
— von Spannungswandlern, zulässige 192
Fehlwinkel von Stromwandlern, zulässige 182
Feinbereichsbeugung 256
Feinmessungen, Korrektionen bei 30
Feinmeßinstrumente 55, 144, 162
—, Eigenverbrauch 60
—, Meßbereichendwerte oder Anschlußwerte 58
Feinstrukturuntersuchungen 263
Feldkonstante 4
Feldspannungsverfahren 231, 232
Feldstärke, elektrische 3
—, magnetische 3, 21
Feldstromverfahren 231, 232
Fernmessung 226
Fernmeßgeberverfahren für abgeriegelte Leitungen 226, 228
FERROMETER 233
Feuchtemesser 207
Filmkammer-Verfahren 264
Filterscheiben 106
Flachprofilinstrumente 47, 168
Flachkammer 265
Fluoreszenzanalysen 264
Flüssigkeitsdämpfung bei Meßwerken 67, 84, 123
Fluxmetrische Konstante 127
Formbezeichnungen für Siemens-Strom- und Spannungswandler 185

Formelzeichen 2, 3
Formfaktor 18
Fotodioden 22
Fotoelektrizität 22
Fotoelemente 23
Fotoleiter 22
Fotomultiplier 22, 260
Fototransistor 22
Fotovorsatz 98
Fotozellen 22
Freiluft-Stützerwandler 189, 199
— -Topfwandler 189, 197, 199
Fremdfelder, Schutz gegen 40, 106
Fremdsynchronisierung 94
Frequenzbereiche der Oszillographen 80
Frequenzen und Wellenlängen elektromagnetischer Schwingungen 5
Frequenzmesser, Ausführungen 45, 168
—, Eigenverbrauch 59
—, Vibrationsmeßwerk 32, 35, 45
Frequenzmultiplex-Verfahren 226, 229
Frequenzschreiber, Meßwerk 73
Frequenzvergleich 107, 168
Frontrahmenmaße von Instrumenten für Schalttafeln und Geräte 47
Fünfschenkelwandler 193

Galvanomagnetische Effekte 25
Galvanometer 34, 121
—, Auswahl 125, 128, 129, 130
Galvanometer-Konstanten 127, 128, 129, 130
γ-Strahlen 257
Ganztafeljoch 231, 232
Ganztafel-Meß- und Sortiereinrichtung 237
Garantiefehlergrenzen 27
Gauß-Effekt 26
Gegeninduktivität 21
Gehäuseform- und -größenbezeichnungen von Instrumenten für Schalttafeln und Geräte 47
Gehäusegrößen von Schreibern 64
Geiger-Müller-Zählrohr 258
Genauigkeitsprüfungen 29
GEOSKOP 243
Geradführung 66
Germanium-Diode 151
Geschossene Aufnahmen 89
Gesteuerte u. gezielte Aufnahmen 88
Gießharzwandler 187, 189, 194, 197
Gleichrichter 147, 151
Gleichrichtergeber-Verfahren 226, 227
Gleichrichtwert 18
Gleichspannungsmessung 113
Gleichspannungs-Meßverstärker 74, 120
Gleichstrom, Grundgleichungen 19
Gleichstrommagnetisierung 232
Gleichstrommessung 113
Gleichstrom-Meßverstärker 74, 118
Gleichstromwandler 186
Gleichungen, Schreibweise physikal. 1
Gleichwert 18
Glimmeinsatzprüfung 194
Glockenzählrohr 258
Grenzleistung 178, 193, 197
Grenzstrom 178, 187
Grenzwert-Kontrolleinrichtung 110
Grenzwertmelder, elektronische 50
Grenzwiderstand, äußerer 125, 127
Griechisches Alphabet 1
Großbereichwandler 183, 189
Große tragbare Kabelmeßbrücke 213
Grundgleichungen 17

Halbleiter, Eigenschaften 11, 22, 23, 24
Halbwertzeit 127
Halleffekt 25
Heinzelmann, Fehlerortung nach 214
HF-Impulsverfahren 243
—, Strom- und Spannungsmessung 151
— -MULTIZET 53, 56, 152
— -Schwingkreisverstärker 74
HF-Stromwandler 152
Hinterwandzelle 23
Hitzdrahtmeßwerk 32, 35
Hochempfindliche Dreheisen-Präzisionsinstrumente 60, 118, 145
— Lichtmarken-Instrumente für Gleichstrom 60
Hochfrequenz-, Strom- und Spannungsmessung 151
Hochleistungs-Elektronenstrahl-Oszillograph 80
Hochspannungs-Kabelmeßbrücke 215
Hochspannungs-prüfeinrichtung 125 kV 241, 242
Hochstrom-Relais-Prüfeinrichtung 244
Hohle-Brücke 247

Holz- und Hopfenfeuchtemesser 207
Hysteresisschleife 232

Idiostatische Schaltung 134
Impedanz 19
Impulsauslösung 95, 107
Impulsfrequenz-Verfahren 226, 228
— - — für Trägerfrequenz-systeme 226, 229
Impulshöhenanalysator 261
Impulslaufzeit-Meßgerät 242
Impulsreflexions-Verfahren 242
Impulsspektrometrie 261
Impulsspektroskopie 261
Impulszählung 260
Indirekte Kompensationsmessung 96
— Meßverfahren 201, 207
Individualdosimetrie 262
Induktanz 19
Induktion, magnetische 3, 21
Induktionsfluß, magnetischer 3, 21
Induktionsmeßwerk 32, 35
Induktions-Quotientenmeßwerk 32
Induktives Suchgerät 243
Induktivität 3, 17, 21
Induktivitätsmessung 220
Innenraumwandler 197
Innenspitzenlager 55
Innenzähler 258
Instrumente f. Schalttafeln u. Geräte, Form- u. Größenbezeichnungen 48
Interne Synchronisierung 94
Ionisationskammern 259
Isolationsmesser 202, 205, 206, 214, 216, 240
Isolations-Prüfeinrichtungen 238
Isolierstoffe, Eigenschaften elektrischer 14, 15
Isotope 257

Jochformen 231, 232

Kabel-Ausbrenngerät 240
Kabelmeßbrücke 210
—, große tragbare 213
—, Hochspannungs- 215
Kabel-Prüfeinrichtungen 240
Kabelumbauwandler 186, 187
Kapazitanz 19
Kapazität, elektrische 3, 17
Kapazitätsänderung, relative, Messung 223
Kapazitätsmessung 214, 220, 223
Kapazitive Fehlortung 214
— Spannungswandler 195, 199
Kaskadenkompensator, Präzisions- 138
Kaskadenwandler 189
Kenndaten von Schwingkreis-verstärkern 77
Kernmagnet-Bauweise 36
kHz-MULTIZET 53, 56, 149
Kippfehlerfreie Lagerung 55
Kippspannung 93
Klasse 27
Klasseneinteilung und Fehler-grenzen elektrischer Meßgeräte 29
— von Spannungswandlern 193
— von Stromwandlern 183
Klassenzeichen 28
Kleine Meßeinrichtungen 202, 209
Kleiner Kompensator 136
Kleinstromwandler, ansteckbar 53
Kleinwandler 187, 189, 197
Klemmenbezeichnungen von Spannungswandlern 194
— von Stromwandlern 184
Klemmenwiderstand 127
Koerzitivfeldstärke 232
Kombinierte Lichtmarken-Instrumente 129
— Spannungsteiler 139, 141
— Strom- und Spannungs-wandler 196
— -Linienschreiber 64, 70
— -Punktschreiber 64, 70
Kompensationsschaltung 76
Kompensatoren 136
—, Präzisions- 137
Kompensator-Meßtische 142
KOMPENSOGRAPH 64, 65, 70, 73
—, Eigenverbrauch 73
Komplexer Kompensator 223, 245
Kondensanz 19
Konduktanz 19
Korrektionen bei Feinmessungen 30
Kraft eines Magnetfeldes 21
Kreisprofilinstrumente 47
Kreuzspulmeßwerk 32, 34, 38, 167
KRISTALLOFLEX 4 264

Laue-Verfahren 264
Legierungen, Eigenschaften 11
Leistung 2, 3, 7, 19
Leistungsempfindlichkeit elektrodyn. Schleifenschwinger 280
Leistungsfaktor 165
—, Abhängigkeit der Wirkleistung und der Blindleistung vom 161
Leistungsfaktormesser, Ausführungen 48, 166
—, Skalenendwerte 167
Leistungsfaktormessung (cos $\varphi$) 165
— (cos $\beta$) 247
Leistungskonstante elektrodynamischer Leistungsschwinger 85
Leistungslose Spannungsmessung 133
Leistungsmesser, Ausführungen 48, 51, 53, 160
—, Skalenendwerte 162, 163
Leistungsmessung 154
— mit dem FERROMETER 235
— mit der Zeiger-Meßanordnung 173
Leistungs-Meßkoffer 162
Leistungsschild für Spannungswandler 195
— für Stromwandler 185
Leistungsschleife, Aufnahme 173
Leistungsschwinger 41, 82
Leitungsprüfer 204
Leitwert, elektrischer 3, 19, 20
Lichtelektrischer Abtastkopf 249, 250
— Effekt 22
Lichtmarken-Galvanometer 121
— - —, Auswahl 125, 128
— -Instrumente 49, 61
— - —, Auswahl kombinierter 125, 129
— -Universalelektrometer 133
— - —, Eigenverbrauch 60
Lichtschutzhaube 62
Lichtschutztubus 106
Lichtstrahl-Oszillographen 80, 82, 92
Lichtzeiger 61, 121, 122
Linienschreiber 64, 65, 66, 72
—, Eigenverbrauch je Meßwerk 72
Locher 112
Luftdämpfung bei Meßwerken 41, 43

Magnetische Energie einer Spule 20
— Dämpfung 126
— Feldstärke 3, 21
Magnetische Feldstärke, Messung 231
— Größen 3, 4
— Induktion 3, 21
— Induktion, Messung 231
— Linsen 252, 253
— Kennwerte, Messungen 231
Magnetische Spannung 3, 21
Magnetischer Fluß 3, 21
— Leitwert 3
— Widerstand 21
Magnetisch weiche Werkstoffe, Eigenschaften 12
Magnetisierungskurve 232
Magnetoelastischer Effekt 26
Magnetostriktion 26
Martensitische Stähle, Eigenschaften 13
Maßeinheiten 2, 3, 4, 5, 6, 7
Maximale Schreibgeschwindigkeit von Elektronenstrahl-Oszillographen 96, 103
— — von Lichtstrahl-Oszillographen 86, 88
Maximalwert, Messung 170, 174, 234
Mechanische Größen 2
Mechanischer Nullpunkt 28
MΩ-µF-Meßeinricht. 132, 202, 216, 220
Mehrbereich-Strommesser 60
— -Spannungsmesser 60
Mehrfach-Nebenwiderstände 115
Mehrfachskale 51, 203
Mehrfarben-Punktschreiber 64, 68
Mehrstrahl-Röhre 96
Meßbereich 28
Meßbereichendwerte, genormte 31
— von Anzeigeinstrumenten 58, 149, 162, 167
— von MULTIZET-Instrumenten 56
— von Schreibern 72
Meßbereiche und Einstellbereiche von Widerstands- und Isolationsmeßgeräten 202
Meßbrücken 201, 207
Meßgerät 28
Meßgeräte, Darstellungen in Schaltzeichnungen 33
Meßgleichrichter 147, 151
Meßgröße 28
Meßinstrument 28
Meßinstrumentaufschriften, Sinnbilder für 32

Meßinstrumente und Meßgeräte in Schaltzeichnungen, Darstellung 33
Meßkerne 180, 181
Meßsatz zum Parallelschalten von Drehstromgeneratoren 168, 281
Meßschaltungswiderstand 125, 127, 131
Meßschaltungs-Widerstandsbereich, zulässiger 126, 127
Meßtisch 141
Meßumformer-Verfahren 226, 227
Meßverstärker, Gleichstrom- und Gleichspannungs- 74
—, Wechselstrom- und Wechselspannungs- 145
Meßwandler 180
— -Prüfeinrichtungen 245
— -Prüftische 247
Meßwerk 28
Meßwerke, Ausführungen 34, 36
— im Siemens-Schreiberprogramm 64
— in Oszillographen 81, 82
Meßwertdrucker 110, 112
Meßwert 28
Metalle, Eigenschaften 10
Metallpapierschreiber 66
Methan-Durchflußzähler 258
μA-MULTIZET 53, 56
Mikro-FERROMETER 234
Mikrovoltmeter 120
Miller-Integrator 93
mV-MULTIZET 53, 56
Milliwattmeter, Präzisions- 61, 163
Minenprüfer 204
Mischspannung 18
Mittelfrequenzstromwandler 186, 187
Mittelwert, arithmetischer, Messung 147, 151
—, linearer, Messung 170, 174, 234
Multiplier 22, 260
MULTITRON 52, 58
MULTIZET-Instrumente 52, 204
— -Schreiber 68
Murray, Fehlerortung nach 211, 214

Nachleuchtdauer von Leuchtschirmen 44, 93
Nachzeichengeräte 98
Nadelschaltung 135
Nanoamperemeter 118
Neben- und Vorwiderstände, zulässige Fehler austauschbarer, getrennt gelieferter 29
Nebenwiderstände 53, 113, 115
—, umschaltbare, in Ayrton-schaltung 131
—, —, in Volkmann-Schaltung 133
Nebenwiderstandszuleitungen 117
Nennbürde 178, 181, 193
Nennlage 28
Nennleistungen, genormte, von Spannungswandlern 192
—, —, von Stromwandlern 181
—, von Spannungswandlern 197
—, von Stromwandlern 187
Nennleistung von Bürden, Messung 247
— von Wandlern 178
Nennspannungen von Spannungswandlern, genormte 191
Nennspannungsabfall von Strommessern 114
Nennspannung von Spannungswandlern 178, 179
Nennströme von Stromwandlern, genormte 180
Nennstrom von Stromwandlern 178, 187
Nennübersetzung 179
Nennüberstromziffer 179, 180
Nennüberstromziffern, genormte 181
90°-Schaltung 158
Nickelhaltige Werkstoffe, Eigenschaften 12
Niederspannungswandler 197
*n*-Meßeinrichtung 248
Nullgalvanometer, Zeiger- 121
—, — -, Auswahl 128
Nullindikatoren 107, 121, 149
Null-Methode 201, 207
Nullpunkt, mechanischer 28, 30, 49
Nullpunktsymmetrierung 249
Nullpunktwiderstand 155, 163
Nullspannungsmesser 168, 169
Nutzbare Schreibbreite von Schreibern 64

Ohmmeter 201
Ohmsches Gesetz 19, 21
Ölausdehnungsgefäß 197

Öldämpfung bei Meßwerken 67, 123
Öl- und Isolations-Prüfeinrichtung 239
Ölwandler 189, 197
Ortsdosisleistungsmessung 262
Ortsfeste Lichtzeiger-Ablesevorrichtungen 124
OSCILLAR 100
OSCILLARZET 100
OSCILLOFIL 87, 92
OSCILLOGRAND 87, 92
OSCILLOMAT, Elektronenstrahl- 100
—, Lichtstrahl- 87, 92
OSCILLOMINK 81
OSCILLOPORT 87, 92
Oszillogrammlängen b. Elektronenstrahl-Oszillographen 102
— bei Lichtstrahl-Oszillographen 89
Oszillographen, Ausführungen 80
—, Elektronenstrahl- 80, 93
—, Flüssigkeitsstrahl- 80, 81
—, Lichtstrahl- 80, 82, 92
Oszillographenverstärker 93, 94, 100, 105
Oscilloscop 93

Papiertransport bei Elektronenstrahl-Oszillographen 102
— — Flüssigkeitsstrahl-Oszillographen 82
— — Lichtstrahl-Oszillographen 87
Papiervorschübe und Papiervorschubwerke bei Schreibern 63
Parallelresonanz 20
Parallelschaltung von Widerständen 20
Parallelspulmeßwerk 69
Peltiereffekt 24
Periodisches System der Elemente 8
Permeabilität 3, 4
Piezoelastischer Effekt 25
Piezoelektrizität 25
Phantastron 93
Phasenlage bei Widerstandsschaltungen 20
Phasenverschiebung 165
Phasenwinkel 18
—, Messung 174
pn-Übergang 23
Porzellan-Stabwandler 187
Präzisions-Digital-Ohmmeter 108, 202
Präzisions-Dreheisenmeßwerk 42
— -Drehschalter 126
Präzisionsinstrumente für Gleichstrom 55, 60, 116
— — —, Neben- und Vorwiderstände 115, 116
Präzisions-Kaskadenkompensator 138, 161
— -Kompensatoren 137
— -Leistungsmesser 61, 162
— -Leistungsmeßwerk 40
— -Meßbrücken 202, 216
— -Meßverstärker 145
— -Milliwattmeter 61, 163
Präzisions-Stöpsel-Stromwandler 162
— -Strom- und Spannungsmesser für Wechsel- und Gleichstrom 60, 118, 145
— -Stufenkompensator 141
Probenwechsler, automatischer 261
Profilinstrumente 47
Programmgeber 110
Promille-Meßbrücke 212
Proportionalzählrohre 259
Prüfeinrichtungen, elektrische 238
—, Isolations- 238
—, Kabel- 240
—, Meßwandler- 245
—, Relais- 243
—, Zähler- 248
Prüfspannungen und Prüfspannungszeichen 31
Prüfwechselspannungen und Prüfstoßspannungen für Wandlerprüfungen 183
Puls-Code-Verfahren, Zeitmultiplex- 226, 230
Pulvermagnete, Eigenschaften 13
Punktauflösungsvermögen 256
Punktschreiber 64, 65, 68, 73

Quadrantenelektrometer 32, 35, 43, 134
Quadrantenschaltung 135
Quadrant-Skale 48
Quotientenmeßwerke 32, 34, 35, 38

Radioaktivität 257
Reaktanz 19
Rechteckgenerator 96
Registrierautomat 99

Registriergerät 99
Reihenresonanz 20
Reihenschaltung von Widerständen 20
Reihenspannung 179
Relais-Prüfeinrichtungen 243
Reluktanz 21
Remanenz 232
Resistanz 19
Richtkräfte 34
Richtleiter 151
Richtmomente 34
Ringkern 231, 232
*RLC*-Meßbrücke 220
Röntgenographische Analysen verfahren, Einrichtungen für 263
Röntgenröhre 263
Rückstrahlaufnahmen 266

Sägezahnspannung 93
Sanatron 93
Saugschaltung 76
Schallfeldverfahren 243
Schalttafelinstrumente 47, 58, 118, 144, 147, 160
Schaltzeichnungen, Darstellungen von Meßinstrumenten und Meßgeräten in 33
Schärfe der Strahlspur 106
Schein..., Grundgleichungen 19
Scheinleistung, Wirkleistung und Blindleistung, Diagramm 161
Scheinwiderstand, Messung 220
Scheitelspannungs-Meßeinrichtung 244
Scheitelwert und Scheitelfaktor 18
Scheringbrücke 223
Schienenwandler 187
Schleifdraht-Meßwiderstand 207, 208
Schleifenschwinger 34, 37, 41, 82
Schnellschwinger 130
Schreibbreite 28
— von Schreibern 64, 68
Schreiber, Ausführungen 63
—, Eigenverbrauch 72
—, Gehäusegrößen 64
Schreibfehler 27
—, zulässiger 29
Schreibgeschwindigkeit von Elektronenstrahl-Oszillogr. 96, 103
— — Lichtstrahl-Oszillographen 86, 88
Schutzwandler 180, 189, 197
Schwinger 82
Schwingkreisverstärker 74
Schwingungsbreite und Schwingungsdauer 18, 127
Sechsfarben-Punktschreiber 64, 69
60-kV-Öl- und Isolations-Prüfeinrichtung 239
Seebeck-Effekt 24
Sehnengeradführung 65
Sektor-Skale 49
Sekundärelektronen-Vervielfacher 22, 260
Sekundärrelais-Prüfeinrichtung 244
Siemens-Elektronenmikroskop 253
— -Elektronenstrahl-Oszillographen 93, 100
— -Lichtstrahl-Oszillographen 82, 92
— -Schreiberprogramm 64
Siliziumhaltige Stähle, Eigenschaften 12
Sinnbilder für Meßinstrumentenaufschriften 32
Skalenanfangswert 28
Skalenausführung 49, 53, 62, 121, 123, 203
Skalenendwert, -länge u. -nullpunkt 28
Skalenstreckenumsetzer 108, 111
Skalenteil 28
Skalenweiser 52
Sortiereinrichtung 110, 112
Spannbandlagerung 36, 47, 61
Spannung, elektrische 3, 18, 19
—, magnetische 3, 21
Spannungsfehler, Messung 245
Spannungsfehler von Wandlern 179
— — —, zulässige 192
Spannungsfestigkeit von Wandlern, Prüfung 184
Spannungsgegenkopplung 76
Spannungskompensation 76
Spannungskonstante 125, 127, 131
SPANNUNGSLUPE 50, 67
Spannungsmesser 56, 58, 59, 60, 129
—, für Gleichspannung 113
—, für HF 152
—, für Wechselspannung 144
Spannungsmessung, Gleichspannung 113, 136
—, HF 151

Spannungsmessung, leistungslose 133
—, Wechselspannung 144
Spannungs-Meßverstärker 74, 145
Spannungsreihe, elektrochemische und thermoelektrische 9
Spannungsschreiber, Eigenverbrauch je Meßwerk 72
Spannungs-Symmetrieanzeiger 249
Spannungsteiler 117, 139, 149
—, kapazitive 97, 106, 153
Spannungsverdoppelungsschaltung 153
Spannungsverstärkung 75
Spannungswandler 191
—, Bauarten 197
— -Bürden, Messung 245
Spannungswandlerprüfung 245
Spektralanalysen, Röntgen- 264
Spektrometer 264
Sperrschicht-Fotoeffekt 23
Spezifischer elektr. Widerstand 14
Spiegelgalvanometer 122
—, Auswahl 125, 130
Spitzenlagerung 41, 47, 55
Spulenschwinger 34, 37, 82
Stabwandler 187
Standardgalvanometer 122
—, Auswahl 130
Standaufnahmen 99
Stempelelektroden 207
Stöpselkontakte 207, 216
Stöpsel-Stromwandler, Präzisions- 162
Störungsschreiber 67
Stoßspannungsoszillograph 80, 96
Stoßspannungsprüfung 184, 194
Strahlengang in einem Lichtmarken-Instrument 62
— im Lichtstrah -Oszillographen OSCILLOGRAND 86
— — Lichtmikroskop und Elektronenmikroskop 252
Strahlenmonitor 262
Strahlenschutzmeßtechnik 262
Strahlungsdetektoren 257
Strahlungsmessung 257
Strahlungsmeßgeräte 260
Streifenjoch 231, 232
Streifenkern 232
Strom, elektrischer 3, 19
Stromfehler, Messung 245
— von Wandlern 179
Stromfehler von Wandlern, zulässige 182
Stromgegenkopplung 76
Stromkompensation 76
Stromkonstante 127, 131
Strommesser 56, 58, 59, 60, 129
—, für Gleichstrom 113
—, für HF 152
—, für Wechselstrom 144
Strommessung, Gleichstrom 113, 136
—, HF 151
—, Wechselstrom 144
Strom-Meßverstärker 74, 145
Stromschreiber, Eigenverbrauch je Meßwerk 72
Stromsymmetrierung 249
Stromverstärkung 75
Stromwandler 179
—, Bauarten 187
— -Bürden, Messung 245
— Form Z 53
Stromwandlerprüfung 245
Stromwärme 20
Stückprüfungen 29
Stufenkompensator, Präzisions- 141
Stufenumsetzer 108
Stützerwandler 153, 155, 189
Summenstromwandler 186
Supergalvanometer 122
—, Auswahl 130
Suszeptanz 19
Symbole für Meßinstrumente und Meßgeräte 33
Synchronisiereinrichtungen 168
Synchronisiereinrichtung, Oszillographen- 94, 107
Synchronoskop 169
Synchronschalter 170
Szintillationszähler 260

Tabakfeuchtemesser 207
tan δ, Messung 233
Taschendosimeter 262
Taschenohmmeter 202, 204
Tastkopf 97
Tastrichter 97, 153
Tastteiler 97, 106
Tastverstärker 97
Technisch reines Eisen, Eigenschaften 12

Teraohmmeter 202, 206
Textur-Goniometer 263, 265, 266
Thermoelektrische Spannungsreihe der Metalle 9
Thermoelektrizität, Thermopaar 24
Thermoumformer 151
Thomsonbrücke 213
Thomson-Wheatstone-Brücke 202, 209, 212, 216, 218
Tintenschreiber 60, 70
Tischinstrumente 52, 58, 113, 144, 147, 160
Topfwandler 189, 197, 199
Tragbare Ablesevorrichtung für Standardgalvanometer 123
— Betriebsinstrumente 51, 58, 119, 144, 147, 160
— Isolations-Prüfeinrichtung 2,5/5 kV 238
— Kabelmeßbrücke, große 213
— Meßwandler-Prüfeinrichtung 247
— Prüfeinrichtung für Sekundärrelais 244
— Schreiber 67
— Wandler 187, 193
Tragkraft eines Magneten 21
Transportable 40-kV-Kabel-Prüfeinrichtung 240
Triggerauslösung 95, 107
Trockenwandler 187, 197
Trommelaufnahmen 89, 99
Typenprüfungen 29

Überschwingung 127
Übersetzungsverhältnis 181
Überstromziffer 179, 180, 181, 186, 187
Übertragungsfehler von Elektronenstrahl-Oszillographen 105
Umbauwandler 186, 187
Ummagnetisierungsleistung 173, 233
Umschaltbare Nebenwiderstände 115, 131
Umschaltbarer Spannungsmesser 60
— —, Erweiterung der Strom- und Spannungsmeßbereiche 116
Umschaltbares Zehnohminstrument 55, 60
— — - —, Erweiterung der Strom- und Spannungsmeßbereiche 116
Umschaltverhältnis von Wandlern 181, 193
Universal-$C$-tan $\delta$-Meßbrücke 223
— -FERROMETER 233
Universalsteller 84
UV-Direktschrift 88

Varley, Fehlerortung nach 210
Verlustfaktor bei Widerstandsschaltungen 20
Verlustfaktormessung 223
Verlustmessung 170, 173
Verlustwinkel, Messung 174
Verstärkermeßplätze 146
Verstärker-Strom- und Spannungsmesser 118
Vibrationsmeßwerk 32, 35, 45, 168
Vielbereich-Lichtmarken-Instrumente 129
— -Mikrovoltmeter 120
— -Nanoamperemeter 118
— -Strommesser 59
— -Strom- und Spannungsmesser 55, 60
Vielfach-Instrumente 51, 52, 147
Vorderwandzelle 23
Vorgabe, Oszillogramm-aufnahmen mit 89
Vorsatzskalen 107
Vorwiderstände 53, 113, 115, 118, 147, 163, 201
—, zulässige Abweich. austauschbarer, getrennt gelieferter Neben- und 29

Wandler 178
— -Prüfeinrichtungen 245
Wandler- und Bürdenmeßeinricht. nach d. Kompensationsverfahren 245
Wattmeterschwinger 41, 82
Wechselspannungsmessung 144, 151
Wechselspannungs-Meßverstärker 145
Wechselstrom 18, 19
Wechselstrommagnetisierung 233
Wechselstrommessung 144, 151
Wechselstrom-Meßverstärker 145
Wechselstromzähler-Prüfeinrichtung 248
Weißsche Bezirke 26
Wellenlängen elektromagnetischer Schwingungen, Frequenzen und 5

Wheatstonebrücke 202, 208, 209, 210, 212, 213, 216, 218
Wickelwandler 181, 189
Wicklungsprüfung 183, 184, 194
Widerstand, elektrischer 3, 17, 19, 20
—, magnetischer 21
Widerstände, Reihen- und Parallelschaltungen 20
— von Präzisionsmeßbrücken 216
Widerstands-Effekt, magnetischer 26
Widerstandsmesser 52, 201, 220
Widerstandsmessung 52, 136, 201, 220
Widerstandszellen 22
Windungsprüfung 183, 184, 194
Wirbelstromdämpfung bei Meßwerken 37, 39, 67
Wirk..., Grundgleichungen 19
Wirk-Blindlast-Vorwiderstand 163
Wirkfaktor 165
Wirkkomponente, Messung 174
Wirkleistung, Abhängigkeit vom Leistungsfaktor 161
Wirkleistungsmesser 58, 59, 61, 154, 160
Wirkleistungsmessung 154, 162
Wirkleistungsschreiber, Eigenverbrauch je Meßwerk 72, 73
Wirkungen, in der Elektromeßtechn. ausgenutzte elektrische 34

X-Punktlage-Verschiebung 95
*X*-Verstärker 94, 100

Y-Verstärker 93, 100

Zählbetrag-Zeit-Drucker 261
Zähler, ausgenutzte elektrische Wirkungen für 34, 35
— -Prüfeinrichtungen 248
Zählkerne 180, 181
Zählrohre 257
Zählrohr-Goniometer 263, 265
Zangenelektroden 207
Zangenwandler 187
Zehnohm-Instrument 60
—, Erweiterung der Strom- und Spannungsmeßbereiche 161
Zeigerausführungen 49, 61
Zeigergalvanometer 121
—, Auswahl 128
Zeiger-Messungen 170
Zeitauflösung in Lichtstrahl-Oszillographen 88
Zeitmarken bei Elektronenstrahl-Oszillographen 94, 103
— bei Lichtstrahl-Oszillographen 87, 103
Zeitmarkierwerke bei Schreibern 64, 67
Zeitmultiplex-Puls-Code-Verfahren 226, 230
Zeitschreibwerke 67
—, Eigenverbrauch 73
Z-Ohmmeter 53, 56, 202, 204
Zulässige Anzeige- und Schreibfehler elektrischer Meßgeräte sowie zulässiger Einfluß 29
Zulässige Fehler austauschbarer, getrennt gelieferter Neben- und Vorwiderstände 29
— Anzeigefehler elektrischer Meßgeräte 29
Zulässiger Meßschaltungs-Widerstandsbereich 126, 127
Zungenfrequenzmesser 45, 168
—, Eigenverbrauch 59
Zungenfrequenzmeßwerk 32, 35, 45
Zweibereichwandler 182
$2^1/_2$-Schaltung 157, 159
Zweifarbenschreiber 68
Zweipolig isolierte Wandler 191, 197
2-Schenkel-Joch 231
Zweistrahl-Oszillograph 96
Zwillingswandler 189, 196, 199
Zwingenelektroden 207
Zwischenstromwandler 186, 189
Zylinderkammer 265